

Modellgestützte Bestimmung des optimalen Schnittzeitpunkts von *Lolium perenne*-Sorten für die Biogasproduktion

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades einer
Doktorin der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
genehmigte

Dissertation

von
Anita Swieter
geboren am 20. Juni 1980
aus Rostock

Eingereicht am: 15.01.2015
Disputation am: 27.04.2015

Berichterstatter/in: Prof. PD Dr.-Ing. Sylvia Moenickes
Prof. Dr. Jörg Michael Greef

2015

Danksagung

An dieser Stelle danke ich all jenen, die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben: Herrn Prof. Dr. Jörg-Michael Greef für die Bereitstellung des interessanten Themas, die wissenschaftliche Betreuung und seine guten Ideen. Frau Prof. Dr. Sylvia Moenickes für ihre engagierte wissenschaftliche Betreuung in jeder Lebenslage, Ihre Begeisterung für das Thema dieser Arbeit, ihren ansteckenden Optimismus und ihre vielen guten Ideen. Frau Tanja Römmer und Frau Stefanie Ahl für die Unterstützung bei den Feld- und Laborarbeiten. Herrn Dr. Ohnmacht für seine wissenschaftliche Unterstützung. Herrn Dr. Ulf Feuerstein von der EGB, Herrn Wilbert Luesink von der NPZ und Herrn Christof Böhm von der SzS und ihren Mitarbeitern für die gute Zusammenarbeit bei den Feldversuchen und die zuverlässige Datenübermittlung. Frau Dr. Dagmar Söndgerath und Frau Dr. Doreen Gabriel für ihre Unterstützung bei der statistischen Auswertung. Herrn Stefan Schomann für sein Interesse und Engagement beim Einarbeiten in sein Masterarbeitsthema und in die vielen Matlab-Dateien. Meinen Bürokolleginnen Justine Lamerre und Mona Richter für ihre Unterstützung durch fachliche Ratschläge und viele anregende Diskussionen. Den Mitarbeitern des Pflanzenbau-Instituts und der Abteilung Umweltsystemanalyse für ihre technische, wissenschaftliche und menschliche Unterstützung. Meinem Mann für sein Interesse an meiner Arbeit und seinen klugen, kühlen Kopf beim Lösen von Problemen und meinen Eltern und Schwiegereltern für die Unterstützung bei der Kinderbetreuung.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XVII
1. Einführung	1
2. Einfluss des Schnittzeitpunkts auf Ertrag und Qualität von <i>Lolium perenne</i>- Sorten unterschiedlicher Reifezeit	5
2.1. Einleitung	5
2.2. Material und Methoden	6
2.2.1. Versuch	6
2.2.2. Statistische Auswertung	8
2.3. Ergebnisse und Diskussion	10
2.3.1. Einfluss der Faktoren Ort, Schnittvariante, Sorte und ihrer Wech- selwirkungen auf TM-Ertrag und Qualität der <i>L. perenne</i> -Sorten .	12
2.3.2. Einfluss der einzelnen Faktoren Ort, Schnittvariante, Sorte und ihrer Zweier-Wechselwirkungen auf Ertrag und Qualität der <i>L.</i> <i>perenne</i> -Sorten	17
2.3.3. Sortenspezifischer Einfluss der Schnittvariante auf Ertrag und Qua- lität	18
2.3.4. Sortenspezifische Erträge und Qualität der <i>L. perenne</i> -Sorten in der einheitlichen und differenzierten Schnittvariante	20
2.3.5. Rangfolge der Sorten in beiden Schnittvarianten hinsichtlich Er- trag und Qualität	28
2.4. Schlussfolgerungen	34

3. Ertrags- und Qualitätsmodellierung von <i>Lolium perenne</i>-Sorten zur Bestimmung des optimalen Schnittzeitpunkts für die Biogasproduktion	39
3.1. Einleitung	39
3.2. Material und Methoden	41
3.2.1. Verifikation des sortenspezifisch optimalen Schnittzeitpunkts	41
3.2.2. Modellbeschreibung	41
3.2.3. Versuche	43
3.2.4. Modellauswahl	45
3.2.5. Modellparametrisierung	48
3.3. Ergebnisse	49
3.3.1. Vergleich maximal verdaulicher Ertrag und Methanertrag	49
3.3.2. Auswahl der integrierten Umweltbedingungen und Modellgüte . . .	51
3.3.3. Geschätzte Modellparameter	54
3.3.4. Modellbasiert optimaler Schnittzeitpunkt	57
3.4. Diskussion	58
3.4.1. Ausgewählte Umweltprozesse	59
3.4.2. Ursachen für die Unterschiede zwischen den geschätzten Modellparametern für die untersuchten Sorten und die durchgeführten Versuche	61
3.4.3. Der optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion	62
3.5. Schlussfolgerungen	63
4. Parameterverifikation und Modellunsicherheit	65
4.1. Einleitung	65
4.2. Material und Methoden	66
4.2.1. Versuch	67
4.2.2. Modellvalidierung	67
4.2.3. Unabhängige Prozess- und Parameteridentifikation	69
4.2.4. Gepoolte Prozess- und Parameteridentifikation	69
4.3. Ergebnisse	69
4.3.1. Modellvalidierung	70
4.3.2. Unabhängig identifizierte Prozesse und geschätzte Parameter . . .	75
4.3.3. Anhand gepoolter Daten identifizierte Prozesse und Parameter . .	82
4.4. Diskussion	86
4.4.1. Modellvalidierung	87

4.4.2. Unabhängig identifizierte Prozesse und geschätzte Parameter . . .	87
4.4.3. Anhand gepoolter Daten identifizierte Prozesse und Parameter . .	90
4.5. Schlussfolgerungen	90
5. Phänologische Entwicklungsstadien zum optimalen Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion	93
5.1. Einleitung	93
5.2. Material und Methoden	94
5.2.1. Versuch	94
5.2.2. Statistische Auswertung	95
5.3. Ergebnisse	95
5.3.1. Vergleich der bestimmten Entwicklungsstadien	96
5.3.2. Zusammenhang der Entwicklungsstadien mit der Futterqualität .	96
5.3.3. Zusammenhang der bestimmten Entwicklungsstadien mit dem ver- daulichen Ertrag	97
5.3.4. Entwicklungsstadien zum Zeitpunkt des maximal verdaulichen Er- trag	100
5.3.5. Entwicklungsstadien zum Zeitpunkt der optimalen Futterqualität	102
5.4. Diskussion	102
5.4.1. Vergleich der bestimmten Entwicklungsstadien	104
5.4.2. Zusammenhang der bestimmten Entwicklungsstadien mit der Fut- terqualität und dem verdaulichen Ertrag	105
5.4.3. Entwicklungsstadien zum Zeitpunkt des maximal verdaulichen Er- trag	106
5.4.4. Entwicklungsstadien zum Zeitpunkt der optimalen Futterqualität	107
5.5. Schlussfolgerungen	107
6. Schlussbetrachtung	109
Literaturverzeichnis	117
A. Varianzanalysen der Qualitätsmerkmale Trockensubstanz, Rohfaser, Rohpro- tein und Zucker	123
B. Parameter des Modells mit integrierter Temperatur-, Bodenfeuchte- und Globalstrahlungsresponse	127

Abbildungsverzeichnis

2.1. Anteile an der Gesamtvarianz der Einflussfaktoren Ort, Schnittvariante, Sorte und ihrer Wechselwirkungen für die Merkmale TM-Ertrag und ELOS im 1. Schnitt 2009 und für den TM-Gesamtertrag 2009.	14
2.2. Anteile an der Gesamtvarianz der Einflussfaktoren Ort, Schnittvariante, Sorte und ihrer Wechselwirkungen für die Merkmale TM-Ertrag und ELOS im 1. Schnitt 2010 und für den TM-Gesamtertrag 2010.	15
2.3. Varianzanteile der Faktoren Ort, Schnittvariante, Sorte und ihrer Wechselwirkungen für die Merkmale TM-Ertrag und ELOS im 1. Schnitt 2009 und für den Gesamtertrag 2009 an den Standorten Asendorf, Malchow und Steinach.	16
2.4. Sortenspezifische TM-Erträge des ersten Schnittes 2009 der einheitlichen Schnittvariante und der differenzierten Schnittvariante über alle Orte. . .	22
2.5. Sortenspezifische TM-Erträge des ersten Schnittes 2010 der einheitlichen Schnittvariante und der differenzierten Schnittvariante über alle Orte. . .	23
2.6. Sortenspezifische Gesamterträge des ersten Hauptnutzungsjahres der einheitlichen Schnittvariante und der differenzierten Schnittvariante über alle Orte.	24
2.7. Sortenspezifische Gesamterträge des zweiten Hauptnutzungsjahres der einheitlichen Schnittvariante und der differenzierten Schnittvariante über alle Orte.	25
2.8. Sortenspezifische ELOS-Gehalte des ersten Schnittes 2009 der einheitlichen Schnittvariante und der differenzierten Schnittvariante über alle Orte.	26
2.9. Sortenspezifische ELOS-Gehalte des ersten Schnittes 2010 der einheitlichen Schnittvariante und der differenzierten Schnittvariante über alle Orte.	27
2.10. Ränge der untersuchten <i>L. perenne</i> -Sorten in der einheitlichen und differenzierten Schnittvariante hinsichtlich ihres TM-Ertrages im ersten Schnitt 2009.	29

2.11. Ränge der <i>L. perenne</i> -Sorten in der einheitlichen und differenzierten Schnittvariante hinsichtlich ihres TM-Ertrages im ersten Schnitt 2010.	30
2.12. Ränge der <i>L. perenne</i> -Sorten in der einheitlichen und differenzierten Schnittvariante hinsichtlich ihres Gesamtertrages im ersten Hauptnutzungsjahr.	31
2.13. Ränge der untersuchten <i>L. perenne</i> -Sorten in der einheitlichen und differenzierten Schnittvariante hinsichtlich ihres Gesamtertrages im zweiten Hauptnutzungsjahr.	32
2.14. Ränge der untersuchten <i>L. perenne</i> -Sorten in der einheitlichen und differenzierten Schnittvariante hinsichtlich ihrer ELOS-Gehalte im ersten Schnitt 2009.	33
2.15. Ränge der <i>L. perenne</i> -Sorten in der einheitlichen und differenzierten Schnittvariante hinsichtlich ihrer ELOS-Gehalte im ersten Schnitt 2010.	34
2.16. TM-Erträge des ersten Schnittes 2009 der einheitlichen Schnittvariante und der differenzierten Schnittvariante der <i>L. perenne</i> -Sorten der mittleren Erntegruppe.	36
2.17. ELOS-Gehalte des ersten Schnittes 2009 der einheitlichen Schnittvariante und der differenzierten Schnittvariante der <i>L. perenne</i> -Sorten der mittleren Erntegruppe.	37
3.1. Umweltbedingungen Tagesmitteltemperatur, Globalstrahlung und Bodenfeuchte der Ernteperioden 2011 und 2012 an den Standorten Asendorf, Braunschweig, Malchow und Steinach.	45
3.2. Trockenmasse (TM)-Ertrag, Rohfaser (XF), Differenz aus TM-Ertrag und XF und Methanertrag der Sorte Abersilo am Standort Braunschweig während des ersten Aufwuchses 2011.	51
3.3. Modellierte und gemessene verdauliche Erträge der frühen Sorte Lipresso und der späten Sorte Sponsor des ersten Schnittes 2011 an den Standorten Asendorf, Braunschweig, Malchow und Steinach.	52
3.4. Modellierte und gemessene verdauliche Erträge der untersuchten Sorten des ersten Schnittes 2012 an den Standorten Braunschweig und Steinach.	52
3.5. Temperaturrensponsen während des ersten Aufwuchses 2011, Strahlungsrensponsen während des ersten Aufwuchses 2012 und Bodenfeuchteresponsen während des dritten Aufwuchses 2012 der <i>L. perenne</i> -Sorten.	56

4.1. Umweltbedingungen Tagesmitteltemperatur, Globalstrahlung und Bodenfeuchte des Versuchsjahres 2013 an den Standorten Asendorf, Braunschweig, Malchow und Steinach.	68
4.2. Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall für den verdaulichen Ertrag der Sorte Aberavon und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 an den Standorten Asendorf, Braunschweig, Malchow und Steinach. . . .	71
4.3. Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall für den verdaulichen Ertrag der Sorte Abersilo und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 an den Standorten Asendorf, Braunschweig, Malchow und Steinach.	72
4.4. Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall für den verdaulichen Ertrag der Sorte Aubisque und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 an den Standorten Asendorf, Braunschweig, Malchow und Steinach.	72
4.5. Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall für den verdaulichen Ertrag der Sorte Bargala und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 an den Standorten Asendorf, Braunschweig, Malchow und Steinach.	73
4.6. Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall für den verdaulichen Ertrag der Sorte Fennema und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 an den Standorten Asendorf, Braunschweig, Malchow und Steinach.	73
4.7. Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall für den verdaulichen Ertrag der Sorte Lipresso und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 an den Standorten Asendorf, Braunschweig, Malchow und Steinach.	74
4.8. Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall für den verdaulichen Ertrag der Sorte Respect und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 an den Standorten Asendorf, Braunschweig, Malchow und Steinach.	74
4.9. Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall für den verdaulichen Ertrag der Sorte Sponsor und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 an den Standorten Asendorf, Braunschweig, Malchow und Steinach.	75

4.10. Temperaturreaktionen der <i>L. perenne</i> -Sorten während des ersten Aufwuchses 2013.	82
5.1. Rohfasergehalt der angebauten <i>L. perenne</i> -Sorten in Abhängigkeit vom BBCH-Code und vom MSC-Index.	98
5.2. Verdaulicher Ertrag der angebauten <i>L. perenne</i> -Sorten in Abhängigkeit vom BBCH-Code und vom MSC-Index.	99
5.3. Maximal verdaulicher Ertrag der frühen, mittleren und späten <i>L. perenne</i> -Sorten und ihr erreichtes Entwicklungsstadium nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode.	101
5.4. Optimaler Rohfasergehalt der frühen, mittleren und späten <i>L. perenne</i> -Sorten und ihr erreichtes Entwicklungsstadium nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode.	104

Tabellenverzeichnis

2.1. Geografische Lage, Klima- und Bodeneigenschaften der Versuchsstandorte sowie Stickstoffdüngereinsatz in der einheitlichen und differenzierten Schnittvariante.	7
2.2. Angebaute <i>L. perenne</i> -Sorten, ihre Züchter, Ploidiestufe, Reifezeit und Erntegruppe.	8
2.3. Erntetermine der einheitlichen und differenzierten Schnittvariante für den ersten Schnitt 2009 und 2010 und Anzahl der durchgeführten Folgeschnitte.	9
2.4. Statistik der NIRS-Kalibration für Rohfaser, die enzymlösliche und enzymunlösliche organische Substanz, Rohprotein und wasserlösliche Zucker.	10
2.5. Statistik der NIRS-Validation für Rohfaser, die enzymlösliche und enzymunlösliche organische Substanz, Rohprotein und wasserlösliche Zucker.	11
2.6. <i>F</i> -Werte und Signifikanzniveaus der Faktoren Ort, Schnittvariante, Sorte und ihrer Wechselwirkungen für die Merkmale TM-Ertrag und ELOS.	13
2.7. Gesamtmittelwerte der Merkmale TM-Ertrag und ELOS der 1. Schnitte und für den TM-Gesamtertrag sowie die Abweichungen der Ortsmittelwerte vom Gesamtmittelwert.	13
2.8. <i>F</i> -Werte und Signifikanzniveaus der einzelnen Faktoren Ort, Schnittvariante, Sorte und ihrer Zweier-Wechselwirkungen für die Merkmale TM-Ertrag und ELOS.	17
2.9. <i>F</i> -Werte und Signifikanzniveaus des Faktors Schnittvariante für die Merkmale TM-Ertrag und ELOS der untersuchten <i>L. perenne</i> -Sorten.	19
2.10. Entwicklungsstadien der <i>L. perenne</i> -Sorten nach der allgemeinen BBCH-Skala zum ersten Schnitt in der einheitlichen und differenzierten Schnittvariante.	21
2.11. Steigungen und Signifikanzniveaus der Regressionsgeraden der sortenspezifischen TM-Erträge und ELOS-Gehalte der einheitlichen und differenzierten Schnittvariante in Abhängigkeit von der Sortenreifezeit.	28

3.1.	Lage und Bodeneigenschaften der Versuchsstandorte.	44
3.2.	Angebaute <i>L. perenne</i> -Sorten, ihre Reifezeit und Erntegruppe.	46
3.3.	Statistik der NIRS-Kalibration für Rohfaser und die enzymlösliche organische Substanz.	46
3.4.	Statistik der NIRS-Validation für Rohfaser und die enzymlösliche organische Substanz.	47
3.5.	<i>F</i> -Werte und Signifikanzniveaus der Faktoren Jahr, Ort, Aufwuchs, Schnittzeitpunkt, Sorte und ihrer Wechselwirkungen für den Trockenmasseertrag und den absoluten Rohfasergehalt in den Erntejahren 2011 und 2012. . .	50
3.6.	AIC-Werte für das Ertragsmodell mit den Umweltprozessen Temperatur, Bodenfeuchte und/oder Globalstrahlung und Anpassung an die Ertragsdaten des ersten und zweiten Hauptnutzungsjahres und den ersten und dritten Schnitt.	53
3.7.	Geschätzte sortenspezifische Modellparameter des Ertragsmodells für das erste und zweite Hauptnutzungsjahr und den ersten und dritten Schnitt. . .	55
3.8.	Konfidenzintervalle der sortenspezifisch geschätzten Wachstumsraten. . .	57
3.9.	Tage zwischen üblichem Schnittzeitpunkt und modellbasiert optimalem Schnittzeitpunkt für jede Sorte und alle Standorte.	57
3.10.	Anteil des modellierten verdaulichen Ertrages zum modellbasiert optimalen Schnittzeitpunkt am modellierten verdaulichen Ertrag zum üblichen Schnittzeitpunkt.	58
4.1.	Nash-Sutcliffe-Koeffizienten für die angebauten Sorten an allen Standorten für das Ertragsmodell mit den für das erste Versuchsjahr angepassten sortenspezifischen Parametern und den Daten der Versuchswiederholung für den ersten und dritten Schnitt.	71
4.2.	AIC-Werte für das Ertragsmodell ohne integrierte Umweltprozesse sowie mit den Umweltprozessen Temperatur, Bodenfeuchte und/oder Globalstrahlung und unabhängige Anpassung an die Ertragsdaten des ersten und dritten Schnittes der Versuchswiederholung.	76
4.3.	Mit dem Modell mit integrierter Strahlungs- und Bodenfeuchteresponse für den ersten Schnitt des ersten Versuchsjahres und den ersten Schnitt der Versuchswiederholung geschätzte sortenspezifische Modellparameter. . .	78
4.4.	Mit dem Modell mit integrierter Temperatur- und Bodenfeuchteresponse für den ersten Schnitt des ersten Versuchsjahres und den ersten Schnitt der Versuchswiederholung geschätzte sortenspezifische Modellparameter. . .	79

4.5. Mit dem Modell ohne Umweltresponse für den dritten Schnitt des ersten Versuchsjahres und den dritten Schnitt der Versuchswiederholung geschätzte sortenspezifische Modellparameter.	80
4.6. Mit dem Modell mit integrierter Temperaturresponse für den dritten Schnitt des ersten Versuchsjahres und den dritten Schnitt der Versuchswiederholung geschätzte sortenspezifische Modellparameter.	81
4.7. AIC-Werte für das Ertragsmodell ohne integrierte Umweltprozesse sowie mit den Umweltprozessen Temperatur, Bodenfeuchte und/oder Globalstrahlung und unabhängige Anpassung an die gepoolten Ertragsdaten des ersten und dritten Schnittes des ersten Versuchsjahres und der Versuchswiederholung.	83
4.8. Anhand der AIC-Werte für die ersten und dritten Aufwüchse der Versuchsjahre H ₁ -H ₃ selektierte Umweltprozesse.	83
4.9. Für den gepoolten Datensatz mit den Daten des ersten Versuchsjahres und der Versuchswiederholung für den ersten Aufwuchs geschätzte sortenspezifische Modellparameter, geschätzt mit dem Modell mit integrierter Temperatur-, Strahlungs- und Bodenfechteresponse.	84
4.10. Für den gepoolten Datensatz mit den Daten des ersten Versuchsjahres und der Versuchswiederholung geschätzte sortenspezifische Modellparameter für den ersten Aufwuchs, geschätzt mit dem Modell mit integrierter Strahlungs- und Bodenfechteresponse und dem Modell mit Temperatur- und Bodenfechteresponse.	85
4.11. Für den gepoolten Datensatz mit den Daten des ersten Versuchsjahres und der Versuchswiederholung geschätzte sortenspezifische Modellparameter für den dritten Aufwuchs, geschätzt mit dem Modell mit integrierter Temperaturresponse.	86
5.1. Bestimmtheitsmaße der linearen Modelle für den Zusammenhang zwischen Rohfasergehalt und den nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode bestimmten Entwicklungsstadien.	96
5.2. Konfidenzintervalle für den Rohfasergehalt zum Entwicklungsstadium „Beginn des Ährenschiebens“ nach der BBCH-Skala und zum Stadium „Inflorescence emergence“ nach der MSC-Methode.	97
5.3. Bestimmtheitsmaße der linearen Modelle für den Zusammenhang zwischen dem verdaulichen Ertrag und den nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode bestimmten Entwicklungsstadien.	97

5.4.	Konfidenzintervalle für den verdaulichen Ertrag zum Entwicklungsstadium „Beginn des Ährenschiebens“ nach der BBCH-Skala und zum Entwicklungsstadium „Inflorescence emergence“ nach der MSC-Methode. . . .	100
5.5.	Entwicklungsstadien der untersuchten <i>L. perenne</i> -Sorten, bestimmt nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode, zum Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrages.	101
5.6.	Konfidenzintervalle für den verdaulichen Ertrag zum mittleren Entwicklungsstadium des maximal verdaulichen Ertrages nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode.	101
5.7.	Entwicklungsstadien der untersuchten <i>L. perenne</i> -Sorten, bestimmt nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode zum Zeitpunkt des optimalen Rohfaser- (XF-)Gehaltes.	103
A.1.	<i>F</i> -Werte und Signifikanzniveaus der Faktoren Ort, Schnittvariante, Sorte und ihrer Wechselwirkungen für die Qualitätsmerkmale des ersten Schnittes Trockensubstanz, Rohfaser, Rohprotein und wasserlösliche Zucker. . .	124
A.2.	<i>F</i> -Werte und Signifikanzniveaus der einzelnen Faktoren Ort, Schnittvariante, Sorte und ihrer Zweier-Wechselwirkungen für die Qualitätsmerkmale des ersten Schnittes Trockensubstanz, Rohfaser, Rohprotein und wasserlösliche Zucker.	125
A.3.	<i>F</i> -Werte und Signifikanzniveaus des Faktors Schnittvariante für die sortenspezifischen Qualitätsmerkmale Trockensubstanz, Rohfaser, Rohprotein und wasserlösliche Zucker des ersten Schnittes.	126
B.1.	Geschätzte sortenspezifische Modellparameter des Ertragsmodells mit allen drei Umweltprozessen Temperatur-, Bodenfeuchte- und Globalstrahlungsresponse für das erste Hauptnutzungsjahr und den ersten und dritten Schnitt.	128
B.2.	Geschätzte sortenspezifische Modellparameter des Ertragsmodells mit allen drei Umweltprozessen Temperatur-, Bodenfeuchte- und Globalstrahlungsresponse für das zweite Hauptnutzungsjahr und den ersten und dritten Schnitt.	129

Abkürzungsverzeichnis

a	erster Schnitt
AIC	Akaike information criterion
AMBAV	Modell zur Berechnung der Bodenfeuchte und Verdunstung
ANOVA	Analysis of variance
b	dritter Schnitt
BBCH	Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und CHemische Industrie
°C	Grad Celsius
CH ₄	Methan
d	Tag
DS	differenzierte Schnittvariante
<i>E</i>	Nash-Sutcliffe-Koeffizient
ELOS	enzymlösliche organische Substanz
ES	einheitliche Schnittvariante
EULOS	enzymunlösliche organische Substanz
FM	Frischmasse
H ₁	erstes Versuchsjahr
H ₂	zweites Versuchsjahr
H ₃	drittes Versuchsjahr
<i>J</i>	Platzhalter in der Temperaturreponsefunktion
<i>k</i>	Anzahl der geschätzten Parameter
kg	Kilogramm
l _N	Normliter
<i>M</i>	Bodenfeuchte
m	Meter
<i>M</i> _{crit}	kritische Bodenfeuchte für Wassermangel
MSC	Mean Stage by Count
N	Stickstoff

n	Stichprobenumfang
nFK	nutzbare Feldkapazität
NIRS	Nahinfrarotspektroskopie
p	Platzhalter in der Temperaturreponsefunktion
Q_{10}	Temperaturkoeffizient
R	Globalstrahlung
r	Residuen
R_{\max}	Globalstrahlung bei Lichtsättigung der Pflanzendecke
r_{\max}	Wachstumsrate
T	Temperatur
t_1	üblicher Schnittzeitpunkt
t_2	modellbasiert optimaler Schnittzeitpunkt
TM	Trockenmasse
T_{opt}	Optimumstemperatur
TS	Trockensubstanz
WSC	wasserlösliche Zucker
XA	Rohasche
XF	Rohfaser
XP	Rohprotein
Y	modellierter verdaulicher Ertrag
y_F	absoluter Rohfasergehalt
y_{\max}	Ertragsmaximum
y_0	Anfangsbedingung
β	Shape-Parameter in der Globalstrahlungsresponsefunktion
γ	Shape-Parameter in der Bodenfeuchteresponsefunktion
θ_F	Rohfaserneubildungsrate
ϕ	Umweltresponse

Kapitel 1.

Einführung

Biogas ist ein wichtiger Bestandteil der erneuerbaren Energien, der zum Einen zur Energiesicherheit und zum Anderen zum Erreichen der Klimaschutzziele beiträgt. Deutschland ist weltweit der größte Produzent von Biogas (DON et al., 2012). Biogas wird hier vor allem aus Maissilage gewonnen (FNR, 2014), da mit diesem Substrat die höchsten Biomasse- und Methanerträge erzielt werden können (AMON et al., 2007; SIELING et al., 2013). Die Profitabilität der Biogasproduktion aus Mais in Verbindung mit Biogassubventionen hat zu einer Ausweitung des Maisanbaus geführt (DMK, 2013). Allerdings sind nicht alle Standorte für den Anbau von Mais geeignet: Auf Standorten mit kalten und nassen Böden, wie z.B. Marschböden, können Maiserträge und -qualität suboptimal und großen Jahresschwankungen unterworfen sein (FARRELL und GILLILAND, 2011; TECHOW et al., 2011). Auch sind erosionsgefährdete Standorte in hügeligen Landschaften auf Grund der starken Bodenbearbeitung und der geringen Bodenbedeckung für den Maisanbau ungeeignet. Deshalb ist es notwendig, neben dem Mais auch alternative nachwachsende Rohstoffe für die Biogasproduktion zu nutzen und deren Leistung zu verbessern. Eine dieser Alternativen ist Gras. Nach Maissilage und vor Getreide-Ganzpflanzensilage (GPS) ist Grassilage das zweitwichtigste Substrat für die Biogasproduktion in Deutschland: 2013 waren 12% der in den deutschen Biogasanlagen eingesetzten Substrate Grassilage, während Maissilage einen Massenanteil von 73% und Getreide-GPS einen Massenanteil von 7% hatten (FNR, 2014). Standorte, die für den Maisanbau ungünstig sind, können hingegen geeignete Grasstandorte sein. So wurden auf Marschstandorten in Norddeutschland mit Grünland im Mittel ähnliche Biomasseerträge erzielt wie mit Mais (QUAKERNACK et al., 2012). Wegen der geringeren Bodenbearbeitung und der dichteren Vegetationsdecke beim Anbau von Gras sind auch

erosionsgefährdete Standorte besser als Grasstandorte geeignet als für den Maisanbau. Hinzu kommt, dass im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP) bestehende Dauergrünlandflächen in Zukunft erhalten werden müssen (Art. 45 Verordnung (EU) Nr. 1307/2013; §§ 15-16 des Direktzahlungen-Durchführungsgesetzes). Dauergrünland umfasst Wiesen und Weiden, aber auch mindestens fünf Jahre alte Ackergrasbestände. Diese Flächen dürfen ab 2015 nicht oder nur noch mit Genehmigung in andere Nutzungen umgewandelt werden. Für diese unter Schutz gestellten Dauergrünlandflächen stellt die Erzeugung von Biomasse für die Biogasproduktion neben der Futterproduktion eine weitere Nutzungsmöglichkeit dar.

Ebenso wie für die Futterproduktion, sind auch für die Biogasproduktion aus Gras sowohl der Biomasseertrag als auch die Rohstoffqualität von Bedeutung (PROCHNOW et al., 2009). Beide hängen vom phänologischen Entwicklungsstadium der Pflanzen ab und verändern sich während einer Wachstumsperiode: Während der Biomasseertrag zunimmt, nehmen die Verdaulichkeit und der rohstoffspezifische Methanertrag mit fortschreitendem Entwicklungsstadium ab (BUXTON, 1996; MCENIRY und O'KIELY, 2013). Daraus folgt, dass der Schnittzeitpunkt ein entscheidender Faktor für den Biogasertrag ist. In der Futterproduktion gilt das Erreichen des Entwicklungsstadiums „Beginn des Ährenschiebens“ als optimaler Schnittzeitpunkt für den ersten Schnitt im Frühjahr (GILLILAND et al., 1995). Die Ansprüche von Nutztieren an die Biomassequalität unterscheiden sich jedoch von denen von Biogasanlagen, wo andere Mikroorganismen und Verweilzeiten vorherrschen (AMON et al., 2007). Frühere Studien zeigen, dass mit einem späten ersten Schnitt, wenn bereits mehr Biomasse gebildet wurde, höhere flächenspezifische Methanerträge erreicht werden konnten (AMON et al., 2007; KANDEL et al., 2013; MCENIRY und O'KIELY, 2013). Desweiteren wurde in einem Feldversuch in Norddeutschland eine hohe Korrelation zwischen Biomasseertrag und flächenspezifischem Methanertrag nachgewiesen (HERRMANN et al., 2012), was ebenfalls einen im Vergleich zur Futterproduktion späteren optimalen Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion nahe legt.

Das Deutsche Weidelgras (*Lolium perenne*) ist eines der ertragreichsten und qualitativ hochwertigsten Futtergräser, insbesondere in den Küstenregionen Europas (KORNHER und TAUBE, 2008). Auf Grund seiner hohen Erträge, der guten Verdaulichkeit und guter Eigenschaften bezüglich der Silagekonservierung, ist es in den meisten heutigen temperierten Graslandgebieten Europas die dominierende Grasart (MCENIRY und O'KIELY, 2013; WHITEHEAD, 1995). Beim Vergleich der substrat- und flächenspezifischen Methanerträge verschiedener verbreiteter Grasarten an drei Schnittterminen wurden die

höchsten Werte vom Deutschen Weidelgras erreicht (McENIRY und O'KIELY, 2013). Zur Zeit sind in der Beschreibenden Sortenliste des Bundessortenamtes 147 *L. perenne*-Sorten aufgeführt, deren Reifezeit sich um bis zu 43 Tage unterscheidet (BUNDESSORTENAMT, 2011). Folglich ist auch der optimale Schnitzeitpunkt sortenspezifisch und kann anhand der Ertrags- und Qualitätsentwicklung bestimmt werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung und Vorhersage des optimalen Schnitzeitpunkts von *L. perenne*-Sorten für die Biogasproduktion mit Hilfe eines Modells für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung. Da sowohl der Grasertrag als auch die Grasqualität sortenspezifisch sind, liegt dabei ein besonderes Augenmerk auf der Untersuchung von Sortenunterschieden. Dazu sollen in einem mehrjährigen Feldversuch *L. perenne*-Sorten mit unterschiedlicher Reifezeit angebaut und deren Ertrags- und Qualitätsmerkmale im Laufe eines Aufwuchses untersucht werden. Zur Definition des optimalen Schnitzeitpunkts für die Biogasproduktion sollen mess- und modellierbare Ertrags- und Qualitätsmerkmale ermittelt werden, die mit dem maximalen Biogasertrag korrelieren. Schließlich soll zur Bestimmung des optimalen Schnitzeitpunkts die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung modelliert werden. Dies ist nur mit einem sortenspezifisch parametrisierbaren Modell möglich, das eine angemessene Anzahl Parameter enthält, die nicht korrelieren. Dazu sollte das Modell lediglich die Prozesse enthalten, die für die Sortenspezifität dominant sind.

Bereits existierende Graswachstumsmodelle erfüllen diese Anforderung nicht. Sie wurden entsprechend ihrer jeweiligen Zielsetzung entwickelt und beinhalten eine Vielzahl von Prozessen und Parametern. Die meisten dieser Modelle wurden für die Anwendung im Bereich Farmmanagement und Decision Support entwickelt (BARRETT et al., 2005; HERRMANN et al., 2005; JOHNSON und THORNLEY, 1983). Andere Modelle zielten auf Verbesserungen in der Gräserzüchtung (HERRMANN und SCHACHTEL, 2001) oder die quantitative Bewertung der Landnutzung (SCHAPENDONK et al., 1998) ab. Das Ziel dieser Modelle war es, möglichst viele Prozesse zu berücksichtigen, die das Graswachstum und die Grasqualität während des gesamten Jahres beeinflussen. Dies führte zu komplexen Modellen mit einer Vielzahl von Parametern. Im Gegensatz zu diesen bereits existierenden Modellen wurde in dieser Arbeit ein Modell angestrebt, das sortenspezifische Parameter für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätssimulation beinhaltet. Dafür ist ein möglichst einfaches Modell vorteilhaft, das nur die Parameter beinhaltet, die notwendig sind, um die Sortenspezifität zu erklären.

In der Futterproduktion wird der optimale Schnittzeitpunkt, vor allem für den ersten Schnitt, anhand des phänologischen Entwicklungsstadiums der Gräser bestimmt. So gilt das Erreichen des Entwicklungsstadiums „Beginn des Ährenschiebens“ als optimaler Schnittzeitpunkt für den ersten Schnitt (GILLILAND et al., 1995), da hier bei schon recht hohem Ertrag noch eine gute Futterqualität vorliegt. Möglicherweise korreliert der optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion ebenfalls mit einem spezifischen Entwicklungsstadium.

In Kapitel 2 wird zunächst der Einfluss des Schnittzeitpunkts auf Ertrag und Qualität verschiedener *L. perenne*-Sorten untersucht. In Kapitel 3 wird mit Hilfe eines Modells für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung von *L. perenne*-Sorten unterschiedlicher Reifezeit ihr optimaler Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion ermittelt. Dabei werden die Umweltprozesse ermittelt, die für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung dominant sind. Außerdem wird untersucht, ob sich Sortenunterschiede auch in den Modellparametern widerspiegeln. Schließlich wird der bestimmte optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion mit dem für die Futterproduktion üblichen Schnittzeitpunkt verglichen. In Kapitel 4 wird das entwickelte Modell anhand eines unabhängigen Datensatzes validiert und gegebenenfalls optimiert. Schließlich wird in Kapitel 5 der Zusammenhang zwischen dem optimalen Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion und dem phänologischen Entwicklungsstadium der angebauten Grassorten untersucht, auch im Hinblick auf Sortenunterschiede.

Kapitel 2.

Einfluss des Schnittzeitpunkts auf Ertrag und Qualität von *Lolium perenne*-Sorten unterschiedlicher Reifezeit

2.1. Einleitung

Das Deutsche Weidelgras (*Lolium perenne*) zählt zu den ertragreichsten und hochwertigsten Futtergräsern und ist in Europa vor allem im Bereich der Küsten von großer Bedeutung (KORNHER und TAUBE, 2008).

Grasertrag und -qualität hängen jedoch vom Entwicklungsstadium ab und variieren während einer Wachstumsperiode: Während der Ertrag mit fortschreitendem Entwicklungsstadium zunimmt, nimmt die Futterqualität, wie z.B. die Verdaulichkeit, ab (GILLILAND et al., 1995). Somit ist der Schnittzeitpunkt ein entscheidender Faktor für Grasertrag und -qualität. Als optimaler Schnittzeitpunkt für ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Ertrag und Futterqualität wird für den ersten Schnitt das Entwicklungsstadium „50 % Ährenschieben“ genannt (GILLILAND et al., 1995).

Derzeit sind in der Beschreibenden Sortenliste 147 *L. perenne*-Sorten aufgeführt, die sich in ihrer Reifezeit um 43 Tage unterscheiden (BUNDESSORTENAMT, 2011). Auf Grund der

unterschiedlichen Reifezeit von *L. perenne*-Sorten ist auch der optimale Schnittzeitpunkt für einen hohen Ertrag und eine gute Futterqualität sortenspezifisch.

Im folgenden Kapitel soll der Einfluss des Schnittzeitpunktes auf Ertrag und Qualität von 20 *L. perenne*-Sorten unterschiedlicher Reifezeit untersucht werden. Dazu wurden die untersuchten Sorten in zwei unterschiedlichen Varianten geschnitten: in der einheitlichen Schnittvariante wurden alle Sorten zum selben Termin geschnitten, während in der differenzierten Schnittvariante ein sortenspezifischer Schnitt zum Entwicklungsstadium „Beginn des Ährenschiebens“ (BBCH 51) erfolgte.

2.2. Material und Methoden

2.2.1. Versuch

An den Züchterstandorten Asendorf (Eurograss Breeding GmbH & Co. KG (EGB)), Lelystad (Barenbrug Holland B.V.), Malchow (Norddeutsche Pflanzenzucht Hans-Georg Lembke KG (NPZ)), Moerstraten (DLF Trifolium A/S) und Steinach (Saatzucht Steinach GmbH & Co KG (SzS)) (Tabelle 2.1) wurden 20 von den beteiligten Züchtern ausgewählte *Lolium perenne*-Sorten der frühen, mittleren und späten Erntegruppe (Tabelle 2.2) für zwei Hauptnutzungsjahre (2009 und 2010) in einer randomisierten Blockanlage mit drei Wiederholungen in zwei Schnittvarianten angebaut. In der einheitlichen Schnittvariante (ES) wurden alle Sorten zum selben Termin geschnitten, in der differenzierten Schnittvariante (DS) wurden die Sorten sortenspezifisch geschnitten, wobei der erste Schnitt für jede Sorte zum Entwicklungsstadium „Beginn des Ährenschiebens“ (BBCH 51) erfolgte. Tabelle 2.3 zeigt die Erntetermine für den ersten Schnitt beider Schnittvarianten und die Anzahl der durchgeführten Folgeschnitte. Die Ernten wurden mit Haldrup Grünfütterern (Inotec Engineering GmbH, Ilshofen, Deutschland) durchgeführt. An jedem Erntetermin wurden an den Züchterstandorten von jeder Sorte die Ertragsmerkmale Frischmasse (FM)-Ertrag, Trockenmasse (TM)-Ertrag und Trockensubstanz (TS) bestimmt. Die Bestimmung von TS und TM erfolgte gravimetrisch durch Trocknung frischen Pflanzenmaterials bei 105°C. An den Standorten Malchow und Steinach wurden außerdem die Entwicklungsstadien nach der allgemeinen BBCH-Skala (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie, MEIER, 1997) erfasst. Zur

Tabelle 2.1.: Geografische Lage, Klima- und Bodeneigenschaften (SPONAGEL, 2005) der Versuchsstandorte sowie Stickstoffdüngereinsatz in der einheitlichen (ES) und differenzierten Schnittvariante (DS).

	Asendorf	Lelystad	Malchow	Moerstraten	Steinach
Längengrad (N)	52,8°	52,5°	53,5°	51,5°	50,4°
Breitengrad (O)	9,0°	5,5°	12,4°	4,3°	11,2°
Höhe üNN [m]	43	-6	19	3	340
Bodenart	sL	T	IS	k.A.	L
Bodenzahl	46	k.A.	58	k.A.	72
Temperatur im langjährigen Mittel [°C]	9,1	10,7	8,8	k.A.	8,6
Niederschlag im langjährigen Mittel [mm]	663	963	559	850	882
N-Dünger gesamt 2009 [kg ha⁻¹] (ES)	306	332	320	304	350
N-Dünger gesamt 2009 [kg ha⁻¹] (DS)	306	332	320	305	420
N-Dünger gesamt 2010 [kg ha⁻¹] (ES)	305	162	320	269	250
N-Dünger gesamt 2010 [kg ha⁻¹] (DS)	250	162	320	305	330

k.A. keine Angabe

Schätzung der Inhaltsstoffe wurde an allen Standorten und an allen Ernteterminen Pflanzenmaterial jeder Sorte bei 60°C ofengetrocknet, auf 1 mm vermahlen und am Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde des Julius Kühn-Instituts Braunschweig mit einem Foss 5000 NahInfraRotSpektrophometer (NIRS) (Foss GmbH, Hamburg, Deutschland) vermessen. Auf Basis einer gut fundierten, über viele Jahre gepflegten NIRS-Kalibration (Tabelle 2.4) wurden die Inhaltsstoffe Rohfaser (XF), enzymlösliche (ELOS) und enzymunlösliche organische Substanz (EULOS), Rohprotein (XP) und wasserlösliche Zucker (WSC) geschätzt. Die Schätzung der XF-Gehalte basierte auf der Analyse nach der Weender-Methode (NAUMANN und BASSLER, 1976), die der ELOS- und EULOS-Gehalte auf der Analyse mittels Cellulase (NAUMANN und BASSLER, 1976). Die Schätzung der XP-Gehalte basierte auf der Stickstoffbestimmung nach der Dumas-Methode (NAUMANN und BASSLER, 1976) und Multiplikation mit dem Faktor 6,25. Die Schätzung der WSC-Gehalte basierte auf der Anthron-Methode (YEMM, 1954). Zur Validierung der NIRS-Daten wurden Stichprobensets von etwa 10% der Proben mit Hilfe der oben genannten nass-chemischen Verfahren im Labor analysiert (Tabelle 2.5). Dazu wurde ebenfalls bei 60°C getrocknetes und auf 1 mm vermahlenes Pflanzenmaterial verwendet.

Tabelle 2.2.: Angebaute *L. perenne*-Sorten, ihre Züchter, Ploidiestufe, Reifezeit und Erntegruppe (BUNDESSORTENAMT, 2009).

Sorte	Züchter	Ploidiestufe	Beginn Ährenschieben [Tage nach 1.4.]	Erntegruppe
Lipresso	EGB	2x	41	früh
Liconda	EGB	2x	45	früh
Abersilo	SzS	2x	46	früh
Lilora	EGB	2x	48	mittel
Trintella	DLF	4x	48	mittel
Aubisque	DLF	4x	50	mittel
Respect	DLF	2x	51	mittel
Bargala	Barenbrug	4x	52	mittel
Fennema	NPZ	2x	52	mittel
Barata	Barenbrug	2x	53	mittel
Chicago	NPZ	2x	53	mittel
Eurocity	EGB	4x	54	mittel
Niata	DLF	2x	55	mittel
Toledo	EGB	2x	57	mittel
Aberavon	SzS	2x	59	spät
Denver	DLF	2x	60	spät
Licampo	EGB	2x	60	spät
Stefani	DLF	2x	60	spät
Forza	DLF	4x	62	spät
Sponsor	DLF	2x	63	spät

Auf Grund starker Trockenheit konnten am Standort Lelystad im zweiten Hauptnutzungsjahr in beiden Schnittvarianten insgesamt nur zwei Schnitte durchgeführt werden.

Wegen eines Mähfehlers im zweiten Hauptnutzungsjahr am Standort Steinach in der einheitlichen Schnittvariante wurden die Daten dieses Standortes für das Jahr 2010 bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

2.2.2. Statistische Auswertung

Der Einfluss der Faktoren Standort, Sorte, Schnittvariante und ihrer Wechselwirkungen auf Grasertrag und -qualität wurde mittels dreifaktorieller ANOVAs, für jedes Hauptnutzungsjahr getrennt, untersucht. Die Varianzanteile der einzelnen Faktoren und Wechselwirkungen wurden als Quotient aus ihren Quadratsummen und den Gesamtquadratsummen berechnet.

Tabelle 2.3.: Erntetermine der einheitlichen (ES) und differenzierten Schnittvariante (DS) für den ersten Schnitt 2009 und 2010 und Anzahl der durchgeführten Folgeschnitte.

Schnitt- variante	Sorte/ Folgeschnitte	Jahr	Asendorf	Lelystad	Malchow	Moerstraten	Steinach
ES	Alle Sorten	09 10	18.05. 26.05.	08.05. 26.05.	12.05. 03.06.	12.05. 27.05.	20.05. -
ES	Folgeschnitte	09	3	4	3	4	4
ES		10	2	1	3	3	3
DS	Lipresso	09 10	04.05. 17.05.	29.04. 06.05.	04.05. 18.05.	06.05. 21.05.	05.05. 04.06.
DS	Liconda	09 10	12.05. 21.05.	29.04. 06.05.	07.05. 25.05.	06.05. 21.05.	07.05. 29.05.
DS	Abersilo	09 10	04.05. 17.05.	29.04. 06.05.	07.05. 18.05.	06.05. 21.05.	07.05. 04.06.
DS	Lilora	09 10	12.05. 21.05.	01.05. 18.05.	07.05. 25.05.	08.05. 26.05.	13.05. 04.06.
DS	Trintella	09 10	12.05. 21.05.	08.05. 02.06.	12.05. 25.05.	08.05. 21.05.	13.05. 29.05.
DS	Aubisque	09 10	14.05. 25.05.	08.05. 26.05.	13.05. 25.05.	12.05. 26.05.	20.05. 04.06.
DS	Respect	09 10	14.05. 25.05.	08.05. 26.05.	12.05. 03.06.	12.05. 26.05.	20.05. 09.06.
DS	Bargala	09 10	18.05. 25.05.	08.05. 26.05.	18.05. 03.06.	15.05. 21.05.	20.05. 04.06.
DS	Fennema	09 10	14.05. 25.05.	11.05. 26.05.	13.05. 03.06.	12.05. 26.05.	13.05. 04.06.
DS	Barata	09 10	18.05. 25.05.	11.05. 26.05.	18.05. 03.06.	15.05. 26.05.	20.05. 09.06.
DS	Chicago	09 10	14.05. 25.05.	11.05. 26.05.	13.05. 03.06.	15.05. 26.05.	20.05. 09.06.
DS	Eurocity	09 10	18.05. 27.05.	14.05. 26.05.	18.05. 03.06.	19.05. 25.05.	20.05. 09.06.
DS	Niata	09 10	20.05. 27.05.	14.05. 26.05.	18.05. 03.06.	19.05. 28.05.	20.05. 09.06.
DS	Toledo	09 10	26.05. 02.06.	18.05. 02.06.	20.05. 09.06.	19.05. 31.05.	29.05. 15.06.
DS	Aberavon	09 10	18.05. 27.05.	14.05. 02.06.	18.05. 03.06.	15.05. 25.05.	20.05. 09.06.
DS	Denver	09 10	26.05. 02.06.	18.05. 02.06.	20.05. 09.06.	19.05. 31.05.	26.05. 15.06.
DS	Licampo	09 10	26.05. 02.06.	18.05. 02.06.	20.05. 09.06.	19.05. 28.05.	26.05. 15.06.
DS	Stefani	09 10	27.05. 02.06.	14.05. 02.06.	18.05. 09.06.	22.05. 28.05.	26.05. 15.06.
DS	Forza	09 10	27.05. 02.06.	18.05. 02.06.	20.05. 09.06.	25.05. 31.05.	26.05. 15.06.
DS	Sponsor	09 10	27.05. 02.06.	18.05. 02.06.	20.05. 09.06.	22.05. 31.05.	26.05. 15.06.
DS	Folgeschnitte	09	3	4	3	4	4
		10	2	1	3	4	3

Tabelle 2.4.: Statistik der NIRS-Kalibration für Rohfaser (XF), die enzymlösliche (ELOS) und enzymunlösliche organische Substanz (EULOS), Rohprotein (XP) und wasserlösliche Zucker (WSC) mit der Anzahl der Spektren in der Kalibration n , ihrer Mittelwerte Mean, Standardabweichungen SD, Standardfehlern der Kalibration SEC, Bestimmtheitsmaßen der Kalibration RSQ, Standardfehlern bei Cross-Validation SEC(V) und Bestimmtheitsmaßen bei Cross-Validation 1-VR.

Inhaltsstoff	n	Mean [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	SD [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	SEC [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	RSQ	SEC(V) [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	1-VR [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]
XF	946	23,09	4,29	0,71	0,97	0,75	0,97
ELOS	230	63,30	8,04	1,86	0,95	2,31	0,92
EULOS	269	256,84	77,09	18,77	0,94	23,07	0,91
XP	798	18,36	5,59	0,99	0,99	0,50	0,99
WSC	298	11,46	5,09	0,62	0,99	0,74	0,98

Der Einfluss der einzelnen Faktoren Standort, Sorte und Schnittvariante sowie der Wechselwirkungen zwischen Ort und Schnittvariante, Ort und Sorte und Schnittvariante und Sorte auf Ertrag und Qualität wurde mit Hilfe von ein- und zweifaktoriellen ANOVAs, für jedes Hauptnutzungsjahr getrennt und über alle Standorte, untersucht.

Der Einfluss der Schnittvariante auf Ertrag und Qualität der einzelnen *L. perenne*-Sorten wurde mit einfaktoriellen ANOVAs für jede der angebauten Sorten, für jedes Hauptnutzungsjahr getrennt und über alle Standorte, untersucht.

Um den vermuteten linearen Zusammenhang zwischen den Erträgen und Inhaltsstoffen und der Reifezeit der Sorten zu überprüfen, wurden lineare Regressionen durchgeführt.

Zur Untersuchung der Rangfolgen der Sorten in beiden Schnittvarianten hinsichtlich Ertrag und Qualität wurden die Ertrags- und Inhaltsstoffdaten der Sorten über alle Orte gemittelt und die Sortenrangfolgen berechnet.

Die Auswertung der Ertrags- und Qualitätsdaten wurde mit Hilfe des Statistikprogramms R (R Development Core Team 2004) und Excel (MS Office 2007) durchgeführt.

Tabelle 2.5.: Statistik der NIRS-Validation für Rohfaser (XF), die enzymlösliche (ELOS) und enzymunlösliche organische Substanz (EULOS), Rohprotein (XP) und wasserlösliche Zucker (WSC) mit der Anzahl der Validationproben n , Mittelwerten der Labor- und NIRS-Proben Mean, Standardabweichungen innerhalb der Laborwerte SD, Standardfehlern der Validation SEP, Bias, SEP korrigiert um den Bias SEP(C), Steigungen der Regressionsgerade S, Bestimmtheitsmaßen der Validation RSQ(P) und Standardabweichungen der Laborwerte/Standardfehler der Validation RPD.

Inhaltsstoff	n	Mean [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	SD [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	SEP [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	Bias [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	SEP(C) [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	S [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	RSQ(P)	RPD [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]
XF vs. XF	88	23,58	2,99	1,07	-0,49	0,96	0,96	0,90	2,78
ELOS vs. ELOS	88	68,87	7,09	4,15	0,06	4,17	0,79	0,71	1,71
EULOS vs. EULOS	88	210,91	58,60	33,67	5,53	33,40	0,78	0,73	1,74
XP vs. XP	88	14,14	5,20	1,55	0,99	1,20	0,97	0,95	3,35
WSC vs. WSC	88	16,07	6,53	5,69	0,47	5,70	0,63	0,37	1,15

2.3. Ergebnisse und Diskussion

Bei der Datenauswertung lag der Fokus auf dem ersten Schnitt und dem Gesamtertrag, da der erste Schnitt die größte Sortendifferenzierung aufweist und den größten Anteil am Gesamtertrag bildet, der wiederum eine weitere wichtige Kenngröße für die Sortenbeurteilung ist.

Der TM-Ertrag gilt als Leistungsmerkmal des Ertrages und ist das wichtigste Merkmal für die Sortenbewertung. Daher werden im Folgenden die Ergebnisse des Merkmals TM-Ertrag als stellvertretendes Ertragsmerkmal vorgestellt.

Neben dem Ertrag sollte in dieser Arbeit auch die Grasqualität untersucht werden. Dazu können die Merkmale TS, XF, ELOS, EULOS, XP und wasserlösliche Zucker herangezogen werden. Da das Merkmal ELOS auch andere Qualitätsmerkmale subsumiert, indem sich z.B. der XF-Gehalt direkt auf den ELOS-Gehalt auswirkt, werden im Folgenden die Ergebnisse des Merkmals ELOS als stellvertretendes Qualitätsmerkmal präsentiert. Die Ergebnisse der anderen untersuchten Qualitätsmerkmale befinden sich in Anhang A.

2.3.1. Einfluss der Faktoren Ort, Schnittvariante, Sorte und ihrer Wechselwirkungen auf TM-Ertrag und Qualität der *L. perenne*-Sorten

In beiden Hauptnutzungsjahren waren die Faktoren Ort, Sorte und die Wechselwirkungen zwischen Ort und Schnittvariante, Ort und Sorte sowie Schnittvariante und Sorte für Ertrag und ELOS-Gehalt des ersten Schnittes und den Gesamtertrag signifikant, wobei die höchsten F-Werte für den Faktor Ort erreicht wurden (Tabelle 2.6). Die Schnittvariante war in beiden Jahren für Ertrag und ELOS-Gehalt des ersten Schnittes signifikant, für den Gesamtertrag war sie nicht signifikant. Die Wechselwirkung zwischen den drei Faktoren Ort, Schnittvariante und Sorte war für Ertrag und ELOS-Gehalt des ersten Schnittes und den Gesamtertrag des zweiten Hauptnutzungsjahres signifikant, wobei hier die niedrigsten F-Werten berechnet wurden. Für den Gesamtertrag des ersten Hauptnutzungsjahres war die Wechselwirkung zwischen allen drei Faktoren nicht signifikant.

Im ersten Hauptnutzungsjahr hatte der Faktor Ort mit 41-78% den weitaus größten

Tabelle 2.6.: F -Werte und Signifikanzniveaus der Faktoren Ort, Schnittvariante (SV), Sorte und ihrer Wechselwirkungen für die Merkmale TM-Ertrag und ELOS, berechnet mit dreifaktoriellen ANOVAs für jedes Hauptnutzungsjahr.

Varianzursache	df		F -Wert					
			TM-Ertrag 1. Schnitt		Gesamtertrag		ELOS 1. Schnitt	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Ort	4	3	511,0***	432,4***	699,1***	45,4***	235,8***	809,9***
SV	1	1	8,6**	59,9***	0,1	0,01	13,2***	106,2***
Sorte	19	19	11,6***	15,0***	4,1***	9,8***	9,7***	7,1***
Ort:SV	4	3	31,6***	62,6***	13,6***	102,9***	28,1***	8,8***
Ort:Sorte	76	57	1,7***	4,1***	1,8***	2,7***	2,6***	4,1***
SV:Sorte	19	19	20,6***	15,1***	2,2**	3,2***	18,6***	12,1***
Ort:SV:Sorte	76	57	1,4*	3,1***	1,1	1,7**	1,4*	2,8***

. $P < 0,1$; * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$

Anteil an der Gesamtvarianz der TM-Erträge und ELOS-Gehalte des ersten Schnittes und der Gesamterträge (Abbildung 2.1). Die Wechselwirkung zwischen Schnittvariante und Sorte hatte mit 11-15% den zweitgrößten Varianzanteil der TM-Erträge und ELOS-Gehalte des ersten Schnittes. Im ersten Schnitt des zweiten Hauptnutzungsjahres hatte ebenfalls der Faktor Ort mit 46-67% den größten Anteil an der Gesamtvarianz der TM-Erträge und ELOS-Gehalte, während die Wechselwirkung zwischen Ort und Schnittvariante mit 24% den größten Varianzanteil der Gesamterträge hatte (Abbildung 2.2).

Im ersten Schnitt 2009 wichen hinsichtlich des TM-Ertrages die Ortsmittelwerte der Standorte Malchow und Steinach am stärksten vom Gesamtmittelwert ab (Tabelle 2.7). Hinsichtlich des ELOS-Gehaltes gab es die größten Abweichungen vom Gesamtmittelwert vom Ortsmittelwert Malchow. In Bezug auf den Gesamtertrag wich im ersten Hauptnutzungsjahr der Ortsmittelwert von Lelystad am stärksten vom Gesamtmittelwert ab. Im ersten Schnitt 2010 zeigte der Ortsmittelwert von Moerstraten die größte Abweichung von Gesamtmittelwert für den TM-Ertrag und ELOS-Gehalt des ersten Schnittes. Hinsichtlich des Gesamtertrages wich der Ortsmittelwert von Lelystad am stärksten vom Gesamtmittelwert ab.

Insgesamt hatte der Faktor Ort von allen untersuchten Faktoren den größten Einfluss auf Grasertrag und -qualität. Dies bestätigen auch die Untersuchungen der einzelnen Faktoren (siehe 2.3.2) und die Ergebnisse für die Qualitätsmerkmale TS-, XF-, XP- und Zuckergehalt (Tabelle A.1 und Tabelle A.2). Würden für das erste Hauptnutzungsjahr nur die drei Standorte in Deutschland Asendorf, Malchow und Steinach berücksichtigt,

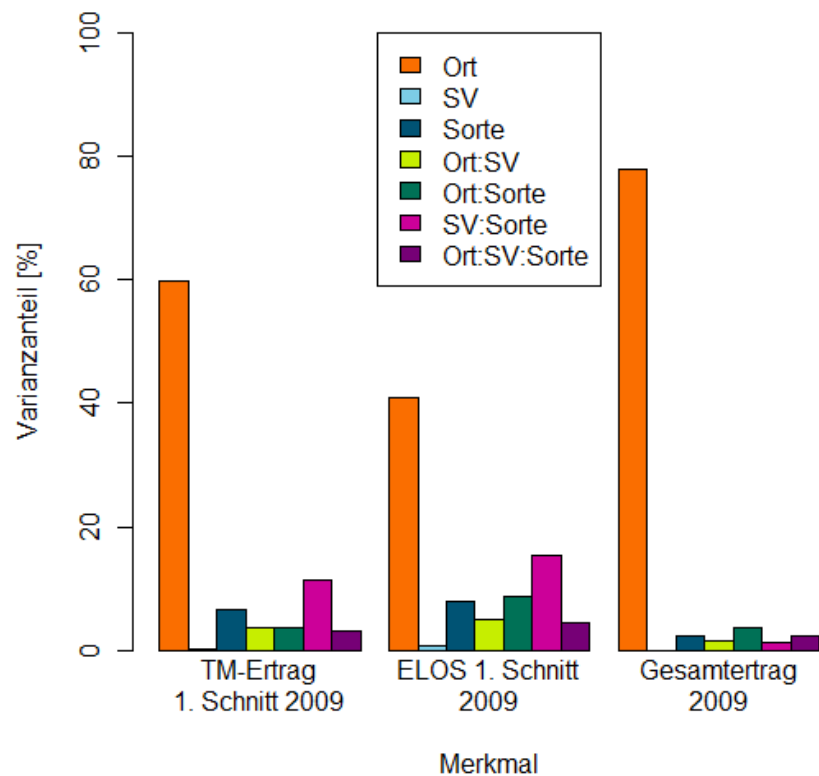


Abbildung 2.1.: Anteile an der Gesamtvarianz der Einflussfaktoren Ort, Schnittvariante, Sorte und ihrer Wechselwirkungen für die Merkmale TM-Ertrag und ELOS im 1. Schnitt 2009 und für den TM-Gesamtertrag 2009.

Tabelle 2.7.: Gesamtmittelwerte der Merkmale TM-Ertrag und ELOS der 1. Schnitte und für den TM-Gesamtertrag sowie die Abweichungen der Ortsmittelwerte vom Gesamtmittelwert.

Merkmal	Gesamt-MW	Asendorf	Lelystad	Malchow	Moerstraten	Steinach
TM S1 09 [kg ha ⁻¹]	64,72	+1,76	-2,69	-15,45	-8,48	+24,8
TM S1 10 [kg ha ⁻¹]	62,48	+5,76	+6,77	+5,36	-17,89	-
TM gesamt 09 [kg ha ⁻¹]	155,46	-34,06	+57,39	-47,08	+5,39	+18,36
TM gesamt 10 [kg ha ⁻¹]	106,93	-3,38	-7,71	+5,68	+5,40	-
ELOS S1 09 [% TM]	68,71	-1,63	-1,84	+5,78	-0,93	-1,35
ELOS S1 10 [% TM]	75,20	-7,45	+2,53	-3,01	+7,96	-

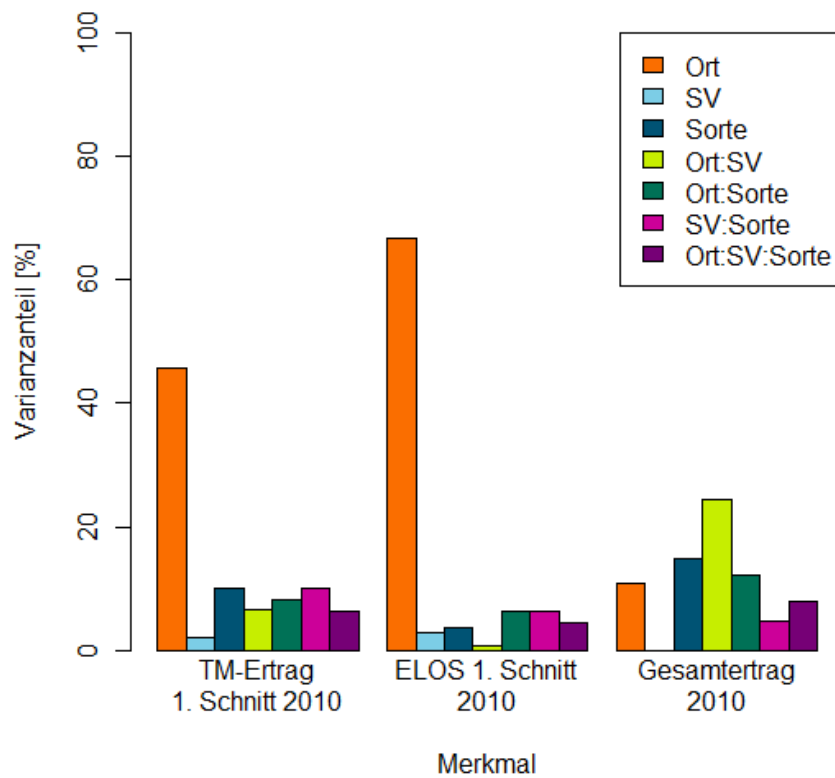


Abbildung 2.2.: Anteile an der Gesamtvarianz der Einflussfaktoren Ort, Schnittvariante, Sorte und ihrer Wechselwirkungen für die Merkmale TM-Ertrag und ELOS im 1. Schnitt 2010 und für den TM-Gesamtertrag 2010.

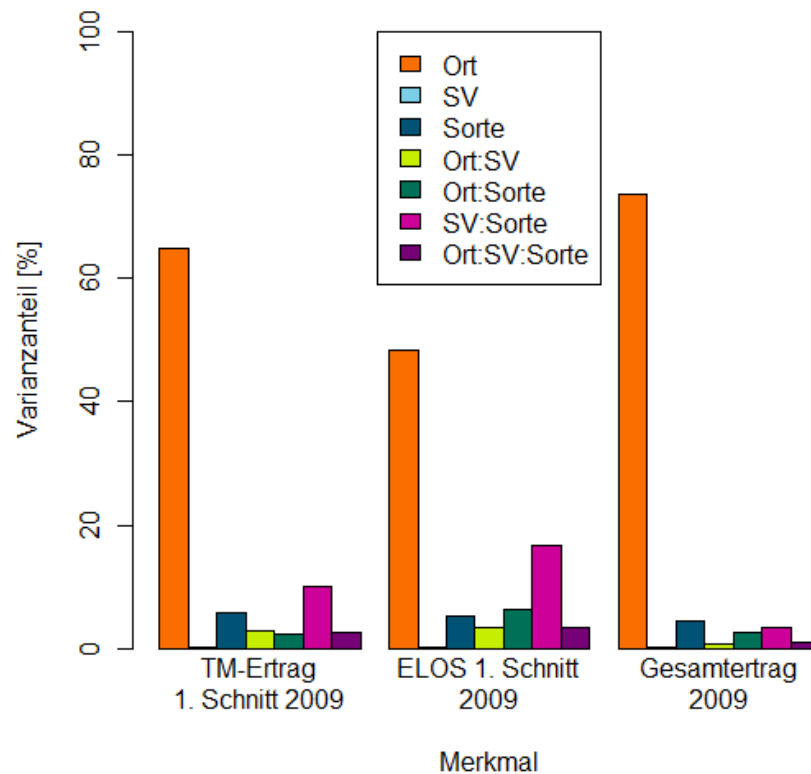


Abbildung 2.3.: Varianzanteile der Faktoren Ort, Schnittvariante, Sorte und ihrer Wechselwirkungen für die Merkmale TM-Ertrag und ELOS im 1. Schnitt 2009 und für den Gesamtertrag 2009 an den Standorten Asendorf, Malchow und Steinach.

änderten sich die Anteile der untersuchten Faktoren an der Gesamtvarianz der TM-Erträge und ELOS-Gehalte kaum (Abbildung 2.3): Der Faktor Ort hätte mit 48-74% weiterhin den weitaus größten Anteil an der Gesamtvarianz, die Wechselwirkung zwischen Schnittvariante und Sorte hätte mit 10-17% den zweitgrößten Varianzanteil der TM-Erträge und ELOS-Gehalte im 1. Schnitt.

Tabelle 2.8.: F -Werte und Signifikanzniveaus der einzelnen Faktoren Ort, Schnittvariante (SV), Sorte und ihrer Zweier-Wechselwirkungen für die Merkmale TM-Ertrag und ELOS, berechnet mit ein- und zweifaktoriellen ANOVAs für jedes Hauptnutzungsjahr.

Varianzursache	df		F -Wert					
			TM-Ertrag 1. Schnitt		Gesamtertrag		ELOS 1. Schnitt	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Ort	4	3	219,9***	133***	526,9***	19,2***	102,6***	319,5***
SV	1	1	1,6	10,3**	0,01	0,004	3,6	14,2***
Sorte	19	19	2,1**	2,7***	0,7	4,2***	2,6***	0,9
Ort:SV	4	3	14,9***	22,7***	10,9***	59,3***	13,3***	4,0**
Ort:Sorte	76	57	0,8	1,6**	1,5**	1,4*	1,3*	1,9***
SV:Sorte	19	19	4,1***	3,0***	0,4	1,4	5,9***	1,7*

. $P < 0,1$; * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$

2.3.2. Einfluss der einzelnen Faktoren Ort, Schnittvariante, Sorte und ihrer Zweier-Wechselwirkungen auf Ertrag und Qualität der *L. perenne*-Sorten

Der Einfluss des Ortes auf TM-Ertrag und ELOS-Gehalt war, wie bereits die Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA (siehe Tabelle 2.6) gezeigt haben, in beiden Hauptnutzungsjahren hoch signifikant, wobei er für den Gesamtertrag 2010 im Vergleich geringer war (Tabelle 2.8). Über alle Orte und Sorten war der Faktor Schnittvariante nur im ersten Schnitt 2010 für Ertrag und ELOS-Gehalt signifikant. Über alle Orte und beide Schnittvarianten war der Faktor Sorte im ersten Schnitt 2009 für Ertrag und ELOS-Gehalt signifikant, während er 2010 sowohl für den Ertrag im ersten Schnitt als auch für den Gesamtertrag signifikant war. Der Einfluss der Wechselwirkung zwischen Ort und Schnittvariante auf Ertrag und ELOS-Gehalt war in beiden Jahren signifikant. Der Einfluss der Wechselwirkung zwischen Ort und Sorte war 2009 für den Gesamtertrag und den ELOS-Gehalt im ersten Schnitt signifikant. 2010 war er für alle drei Merkmale signifikant. Über alle Orte war die Wechselwirkung zwischen Schnittvariante und Sorte in beiden Jahren für den Ertrag und den ELOS-Gehalt des ersten Schnittes signifikant.

2.3.3. Sortenspezifischer Einfluss der Schnittvariante auf Ertrag und Qualität

Über alle Orte war der Einfluss der Schnittvariante auf den TM-Ertrag des ersten Schnittes 2009 für die frühen Sorten Lipresso, Liconda und Abersilo, für die Sorte am Übergang der frühen zur mittleren Erntegruppe Lilora und die Sorte am Übergang der mittleren zur späten Erntegruppe Toledo sowie für die späten Sorten Licampo, Stefani und Forza signifikant (Tabelle 2.9). Für den TM-Ertrag des ersten Schnittes 2010 war die Schnittvariante über alle Orte lediglich für die frühen Sorten Lipresso, Liconda, Abersilo und die Sorte am Übergang der frühen zur mittleren Erntegruppe Lilora signifikant. Über alle Orte hatte in beiden Hauptnutzungsjahren die Schnittvariante für keine der untersuchten Sorten einen signifikanten Einfluss auf den Gesamtertrag. Der Einfluss der Schnittvariante auf den ELOS-Gehalt des ersten Schnittes 2009 war über alle Orte für die frühen Sorten Lipresso, Liconda und Abersilo, für die Sorte am Übergang der frühen zur mittleren Erntegruppe Lilora und die Sorte am Übergang der mittleren zur späten Erntegruppe Toledo sowie für die späten Sorten Denver, Stefani, Forza und Sponsor signifikant. Für den ELOS-Gehalt des ersten Schnittes 2010 war die Schnittvariante über alle Orte für die frühe Sorte Abersilo, die Sorte am Übergang der mittleren zur späten Erntegruppe Toledo sowie für die späten Sorten Forza und Sponsor signifikant. Ähnliche Ergebnisse wurden für die Qualitätsmerkmale TS-, XF- und XP-Gehalt erzielt (Tabelle A.3). Der Einfluss der Schnittvariante auf den Zuckergehalt war hingegen für keine der untersuchten Sorten signifikant.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass abhängig von der Sorte und unabhängig vom Ort lediglich im ersten Schnitt Ertrag und Qualität, mit Ausnahme des Zuckergehaltes, signifikant von der Schnittvariante beeinflusst wurden. Dabei hatte die Schnittvariante vor allem auf Ertrag und Qualität früher und später Sorten einen signifikanten Einfluss, da die Schnitttermine beider Schnittvarianten für diese Sorten am weitesten auseinander lagen (siehe Tabelle 2.3). Somit wiesen die frühen und späten Sorten zum Zeitpunkt des ersten Schnittes in beiden Schnittvarianten auch die größten Unterschiede in ihrer phänologischen Entwicklung auf (Tabelle 2.10). In früheren Untersuchungen an *L. perenne*-Sorten wurde bereits ein enger Zusammenhang zwischen dem Entwicklungsstadium und Grasertrag und –qualität gezeigt: Ein früherer erster Schnitt bringt einen niedrigeren TM-Ertrag und einen höheren Gehalt an verdaulicher organischer Substanz mit sich, während mit einem späteren ersten Schnitt ein höherer TM-Ertrag und ein

Tabelle 2.9.: F -Werte und Signifikanzniveaus des Faktors Schnittvariante (SV) für die Merkmale TM-Ertrag und ELOS der untersuchten *L. perenne*-Sorten, berechnet mit einfaktoriellen ANOVAs für jedes Hauptnutzungsjahr.

Sorte (Reifezeit [Tage nach 1.4.]	df	F -Wert					
		TM-Ertrag 1. Schnitt		Gesamtertrag		ELOS 1. Schnitt	
		2009	2010	2009	2010	2009	2010
Lipresso (41)	1	11,1**	20,1***	0,5	2,7	20,0***	1,5
Liconda (45)	1	18,0***	9,4**	1,0	2,6	4,5*	0,3
Abersilo (46)	1	12,8**	27,3***	2,1	3,7.	11,8**	11,0**
Lilora (48)	1	4,6*	5,4*	0,4	0,2	11,8**	0,0003
Trintella (48)	1	0,7	2,0	0,02	0,4	0,5	0,1
Aubisque (50)	1	0,7	2,6	0,1	0,004	0,1	0,2
Respect (51)	1	0,05	0,2	0,1	0,1	0,02	0,2
Fennema (52)	1	0,4	3,2.	0,02	0,1	0,1	0,8
Bargala (52)	1	0,02	0,6	0,6	0,3	0,5	0,8
Chicago (53)	1	0,2	0,1	0,1	1,7	0,6	1,8
Barata (53)	1	0,5	0,2	0,1	0,1	1,8	0,1
Eurocity (54)	1	1,0	0,3	0,1	0,1	1,4	0,5
Niata (55)	1	2,2	0,1	0,04	0,4	1,3	0,5
Toledo (57)	1	8,1**	1,4	0,5	0,4	13,7***	7,9*
Aberavon (59)	1	1,7	0,9	0,01	1,4	3,4.	0,4
Denver (60)	1	2,3	0,1	0,3	0,005	14,2***	3,2.
Licampo (60)	1	7,4*	0,7	0,6	0,8	3,8.	2,2
Stefani (60)	1	8,5**	0,5	0,5	1,1	8,3**	3,4.
Forza (62)	1	5,2*	1,3	0,2	0,03	15,6***	4,7*
Sponsor (63)	1	2,4	1,3	0,3	3,2.	4,6*	12,2**

. $P < 0,1$; * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$

geringerer Gehalt an verdaulicher organischer Substanz erreicht wird (GILLILAND et al., 1995). Dies zeigt sich auch in den TM-Erträgen und ELOS-Gehalten der ersten Schnitte der frühen und späten Sorten (siehe 2.3.4).

Der Zeitpunkt des ersten Schnittes beeinflusst jedoch auch den Ertrag des Folgeaufwuchses: Bei einem verspäteten ersten Schnitt fällt durch die Beschädigung der Vegetationskegel der meisten Triebe und eine damit verbundene langsamere Nachwuchsgeschwindigkeit der Ertrag des zweiten Aufwuchses niedriger aus als bei einem früheren ersten Schnitt (GILLILAND et al., 1995; TAUBE, 1986). So können durch unterschiedliche Schnittzeitpunkte erreichte Ertragsunterschiede im ersten Schnitt durch die Erträge im Nachwuchs ausgeglichen werden. Dies erklärt, weshalb die Schnittvariante zwar den Ertrag der frühen und späten Sorten im ersten Schnitt beider Hauptnutzungsjahre signifikant beeinflusst hat, jedoch nicht ihren Gesamtertrag. Durch einen späten ersten Schnitt und nur wenige Folgeschnitte kann allerdings auch ein höherer Jahresertrag erreicht werden (KORNHER und TAUBE, 2008).

2.3.4. Sortenspezifische Erträge und Qualität der *L. perenne*-Sorten in der einheitlichen und differenzierten Schnittvariante

Im ersten Schnitt des ersten Hauptnutzungsjahres hatten die frühen Sorten in der einheitlichen Schnittvariante höhere Erträge aber niedrigere ELOS-Gehalte als in der differenzierten Schnittvariante (Abbildung 2.4 und 2.8). Bei den späten Sorten war es umgekehrt. Im ersten Schnitt des zweiten Hauptnutzungsjahres hatten nur die frühen Sorten in der einheitlichen Schnittvariante höhere Erträge als in der differenzierten Schnittvariante (Abbildung 2.5). Die späten Sorten hatten in der einheitlichen Schnittvariante höhere ELOS-Gehalte als in der differenzierten Schnittvariante (Abbildung 2.9). Analog zu den Ergebnissen der sortenspezifischen Varianzanalysen (siehe 2.3.3) unterschieden sich die Gesamterträge zwischen den beiden Schnittvarianten in beiden Jahren kaum voneinander (Abbildung 2.6 und 2.7).

Die Abhängigkeit der sortenspezifischen TM-Erträge und ELOS-Gehalte von der Reifezeit der Sorten war im ersten Schnitt beider Hauptnutzungsjahre und Schnittvarianten signifikant (Tabelle 2.11). Ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem TM-Gesamtertrag und der Reifezeit konnte lediglich für die differenzierte Schnittvariante im

Tabelle 2.10.: Entwicklungsstadien der *L. perenne*-Sorten nach der allgemeinen BBCH-Skala zum ersten Schnitt in der einheitlichen (ES) und differenzierten Schnittvariante (DS) an den Standorten Malchow und Steinach.

Sorte	Jahr	ES		DS	
		Malchow	Steinach	Malchow	Steinach
Lipresso	09	50	60	k.A.	41
	10	57	59	51	58
Liconda	09	47	55	k.A.	51
	10	57	61	51	54
Abersilo	09	51	53	k.A.	51
	10	57	57	51	58
Lilora	09	46	56	k.A.	56
	10	55	55	51	53
Trintella	09	52	56	k.A.	51
	10	55	57	51	54
Aubisque	09	50	51	k.A.	54
	10	55	57	51	57
Respect	09	50	53	k.A.	56
	10	52	56	52	57
Bargala	09	51	52	k.A.	53
	10	53	56	53	53
Fennema	09	51	54	k.A.	51
	10	53	57	53	53
Barata	09	50	51	k.A.	54
	10	51	55	51	55
Chicago	09	45	51	k.A.	54
	10	51	54	51	56
Eurocity	09	51	51	k.A.	54
	10	55	56	51	57
Niata	09	52	50	k.A.	53
	10	51	54	51	55
Toledo	09	50	42	k.A.	53
	10	45	52	52	56
Aberavon	09	48	50	k.A.	52
	10	51	53	51	53
Denver	09	49	38	k.A.	51
	10	49	54	53	55
Licampo	09	51	41	k.A.	51
	10	49	52	53	57
Stefani	09	44	39	k.A.	51
	10	49	53	53	56
Forza	09	50	39	k.A.	51
	10	47	52	53	55
Sponsor	09	47	39	k.A.	51
	10	45	53	51	55

k.A. keine Angabe

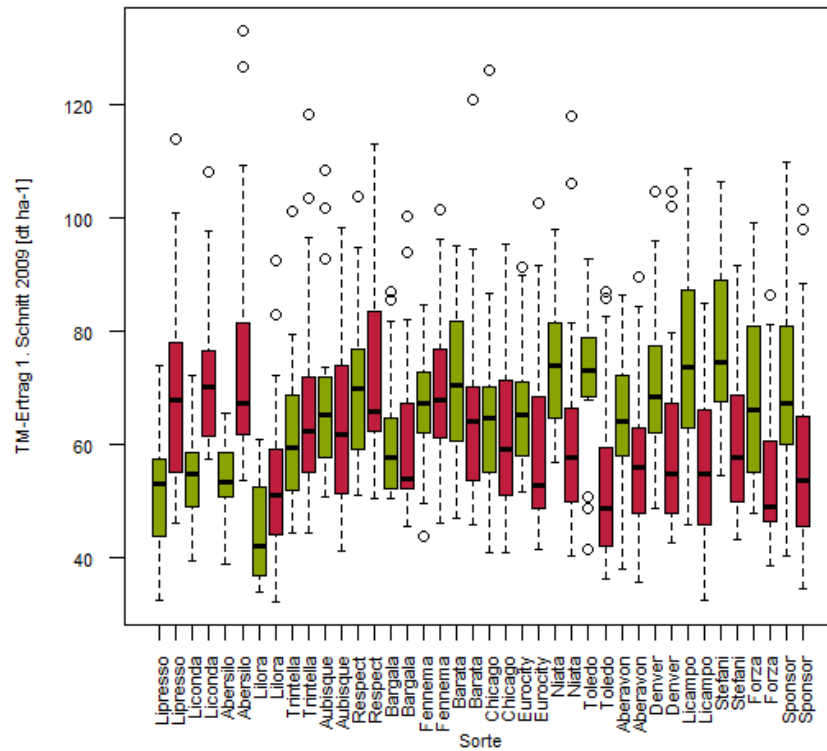


Abbildung 2.4.: Sortenspezifische TM-Erträge des ersten Schnittes 2009 der einheitlichen Schnittvariante (rot) und der differenzierten Schnittvariante (grün) über alle Orte. Jede Box entspricht dem Bereich, in dem die mittleren 50% der Daten liegen. Die Boxgrenzen kennzeichnen das obere und untere Quartil. Der Querbalken gibt den Median an.

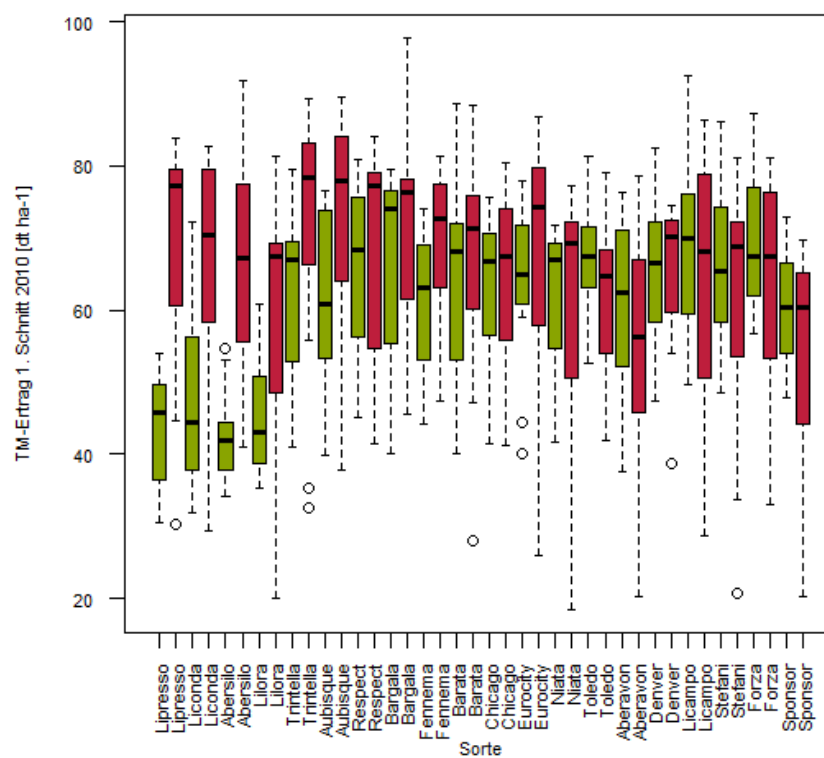


Abbildung 2.5.: Sortenspezifische TM-Erträge des ersten Schnittes 2010 der einheitlichen Schnittvariante (rot) und der differenzierten Schnittvariante (grün) über alle Orte.

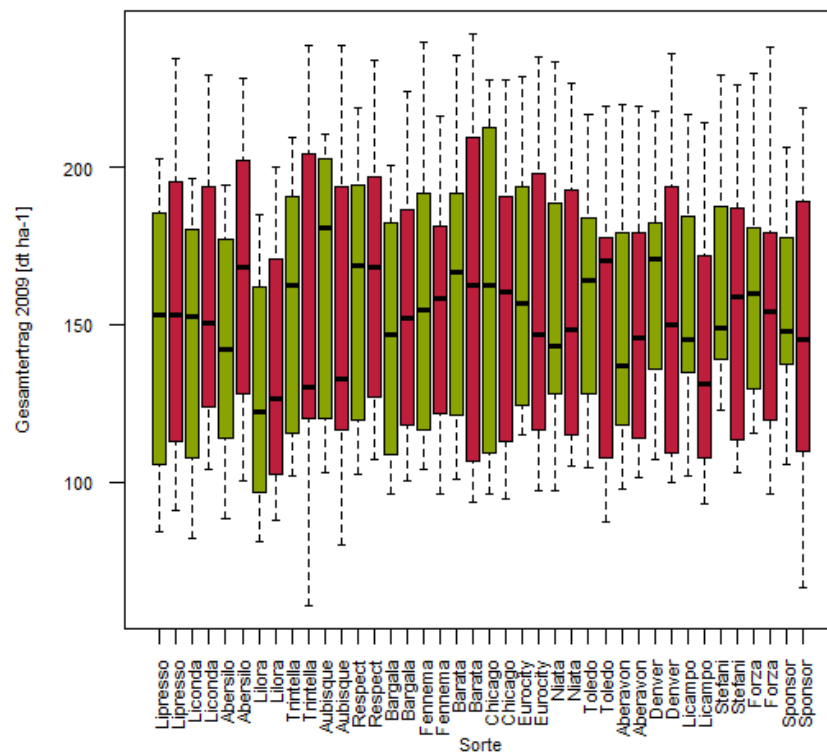


Abbildung 2.6.: Sortenspezifische Gesamterträge des ersten Hauptnutzungsjahres der einheitlichen Schnittvariante (rot) und der differenzierten Schnittvariante (grün) über alle Orte.

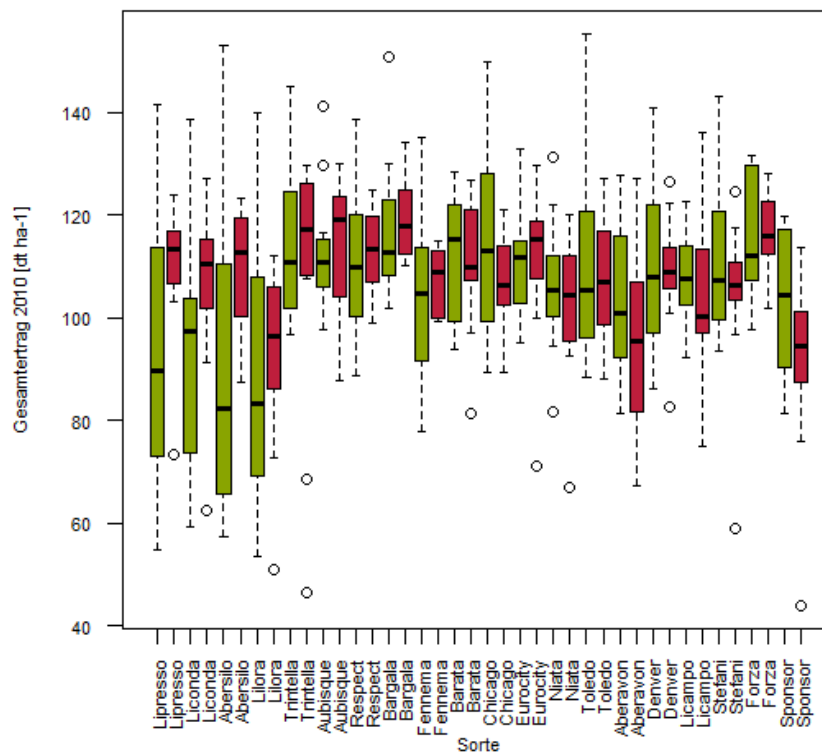


Abbildung 2.7.: Sortenspezifische Gesamterträge des zweiten Hauptnutzungsjahres der einheitlichen Schnittvariante (rot) und der differenzierten Schnittvariante (grün) über alle Orte.

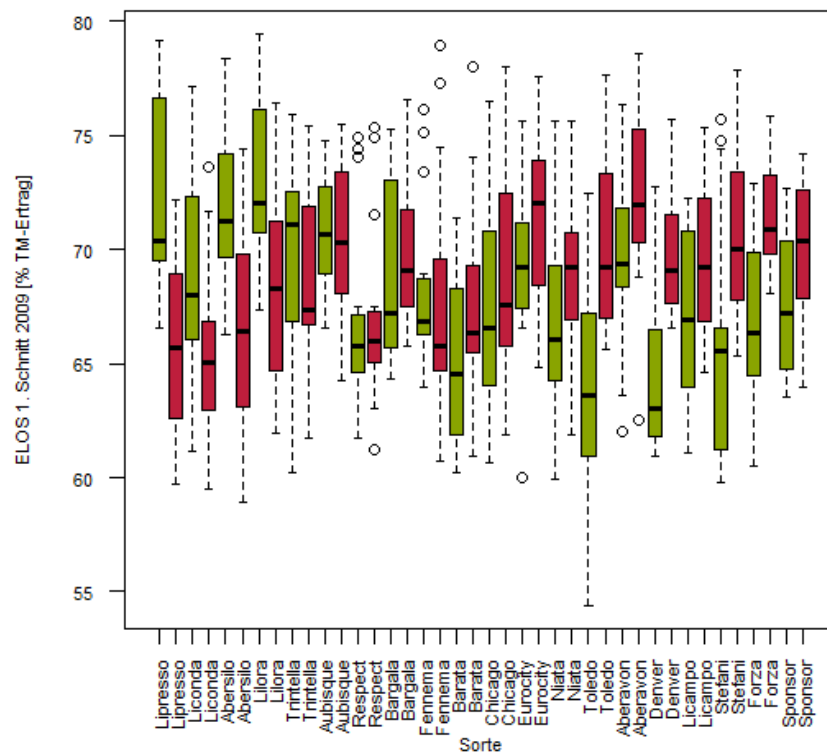


Abbildung 2.8.: Sortenspezifische ELOS-Gehalte des ersten Schnittes 2009 der einheitlichen Schnittvariante (rot) und der differenzierten Schnittvariante (grün) über alle Orte.

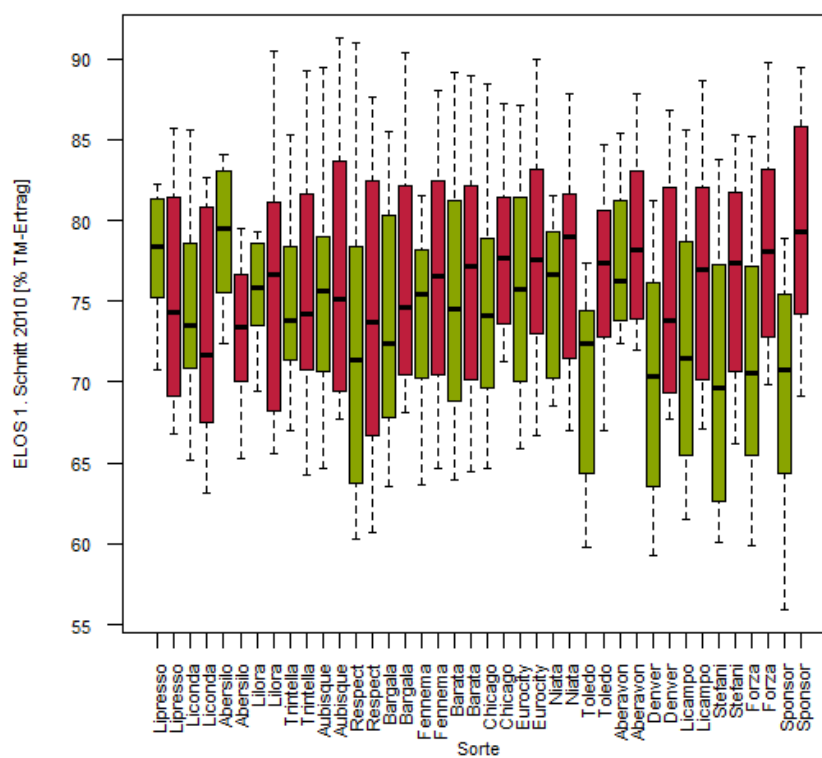


Abbildung 2.9.: Sortenspezifische ELOS-Gehalte des ersten Schnittes 2010 der einheitlichen Schnittvariante (rot) und der differenzierten Schnittvariante (grün) über alle Orte.

Tabelle 2.11.: Steigungen und Signifikanzniveaus der Regressionsgeraden der sortenspezifischen TM-Erträge und ELOS-Gehalte der einheitlichen (ES) und differenzierten Schnittvariante (DS) in Abhängigkeit von der Sortenreifezeit.

	TM-Ertrag 1. Schnitt		Gesamtertrag		ELOS 1. Schnitt	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010
ES	-0,73***	-0,51**	-0,46	-0,30.	+0,24***	+0,19*
DS	+1,08***	+1,03***	+0,76.	+0,69**	-0,29***	-0,32***

. $P < 0,1$; * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$

zweiten Hauptnutzungsjahr ermittelt werden. Die Steigungen der Regressionsgeraden der sortenspezifischen Erträge und ELOS-Gehalte beider Schnittvarianten in Abhängigkeit von der Reifezeit der Sorten unterschieden sich mit 1,81 am stärksten beim TM-Ertrag im ersten Schnitt des ersten Hauptnutzungsjahres. Mit 0,52 unterschieden sie sich am geringsten beim ELOS-Gehalt im ersten Schnitt des zweiten Hauptnutzungsjahres.

2.3.5. Rangfolge der Sorten in beiden Schnittvarianten hinsichtlich Ertrag und Qualität

In Bezug auf den TM-Ertrag im ersten Schnitt des ersten Hauptnutzungsjahres hatten die frühen Sorten, aber auch die mittlere Sorte Niata in der einheitlichen Schnittvariante einen hohen Rang und in der differenzierten Schnittvariante einen niedrigen Rang (Abbildung 2.10). Bei den meisten späten Sorten und der Sorte am Übergang der mittleren zur späten Erntegruppe Toledo war es umgekehrt. Die Rangfolge der übrigen Sorten war in beiden Schnittvarianten ähnlich. Im ersten Schnitt des zweiten Hauptnutzungsjahres war hinsichtlich des TM-Ertrages eine umgekehrte Rangfolge in den beiden Schnittvarianten für die frühen Sorten Abersilo und Lipresso, für die späten Sorten Forza, Licampo und Stefani und für die Sorte am Übergang der mittleren zur späten Erntegruppe Toledo zu beobachten (Abbildung 2.11). In Bezug auf den Gesamtertrag 2009 hatten vor allem die drei frühen Sorten eine umgekehrte Rangfolge in beiden Schnittvarianten, aber auch die späte Sorte Denver und die Sorte am Übergang der mittleren zur späten Erntegruppe Toledo (Abbildung 2.12). 2010 änderte sich die Rangfolge im Gesamtertrag für die beiden frühen Sorten Abersilo und Lipresso (Abbildung 2.13). Hinsichtlich der ELOS-Gehalte im ersten Schnitt des ersten Hauptnutzungsjahres hatten die frühen Sorten und die Sorte am Übergang der frühen zur mittleren Erntegruppe Lilora in der differenzierten

Schnittvariante einen hohen Rang und in der einheitlichen Schnittvariante einen niedrigen Rang (Abbildung 2.14). Für die späten Sorten Forza, Stefani und Denver und für die Sorte am Übergang der mittleren zur späten Erntegruppe Toledo war es umgekehrt. Die übrigen Sorten hatten in beiden Schnittvarianten eine ähnliche Rangfolge. In Bezug auf den ELOS-Gehalt im ersten Schnitt des zweiten Hauptnutzungsjahres wurde für die frühen Sorten Abersilo und Lipresso, die Sorte am Übergang der frühen zur mittleren Erntegruppe Lilora und die späten Sorten Forza und Sponsor eine umgekehrte Rangfolge in beiden Schnittvarianten beobachtet (Abbildung 2.15).

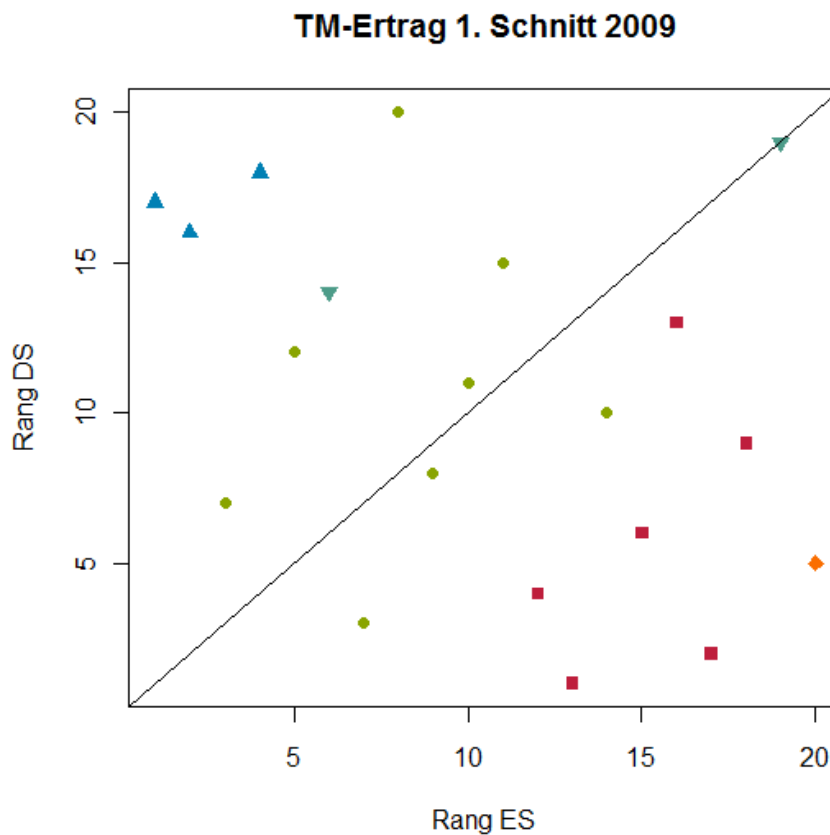


Abbildung 2.10.: Ränge der untersuchten *L. perenne*-Sorten in der einheitlichen (ES) und differenzierten (DS) Schnittvariante hinsichtlich ihres TM-Ertrages im ersten Schnitt 2009. Sorten der frühen Erntegruppe werden durch blaue Dreiecke, Sorten der mittleren Erntegruppe durch grüne Kreise und Sorten der späten Erntegruppe durch rote Quadrate repräsentiert. Frühe mittlere Sorten und die späte mittlere Sorte werden durch türkise nach unten zeigende Dreiecke bzw. orange Rauten repräsentiert.

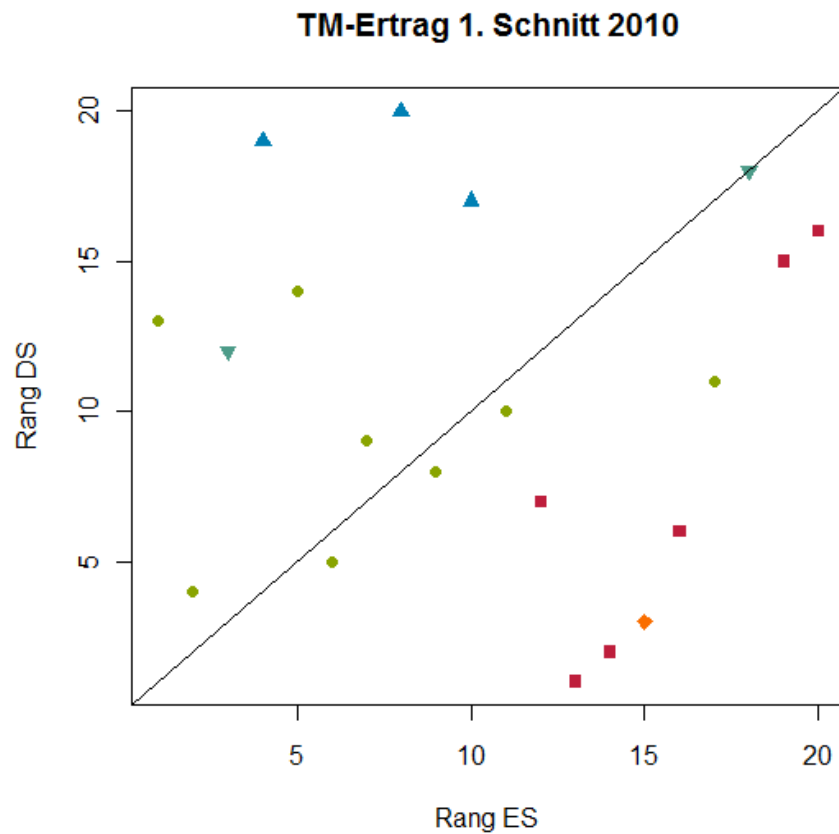


Abbildung 2.11.: Ränge der *L. perenne*-Sorten in der einheitlichen (ES) und differenzierten (DS) Schnittvariante hinsichtlich ihres TM-Ertrages im ersten Schnitt 2010. Sorten der frühen Erntegruppe werden durch blaue Dreiecke, Sorten der mittleren Erntegruppe durch grüne Kreise und Sorten der späten Erntegruppe durch rote Quadrate repräsentiert. Frühe mittlere Sorten und die späte mittlere Sorte werden durch türkise nach unten zeigende Dreiecke bzw. orange Rauten repräsentiert.

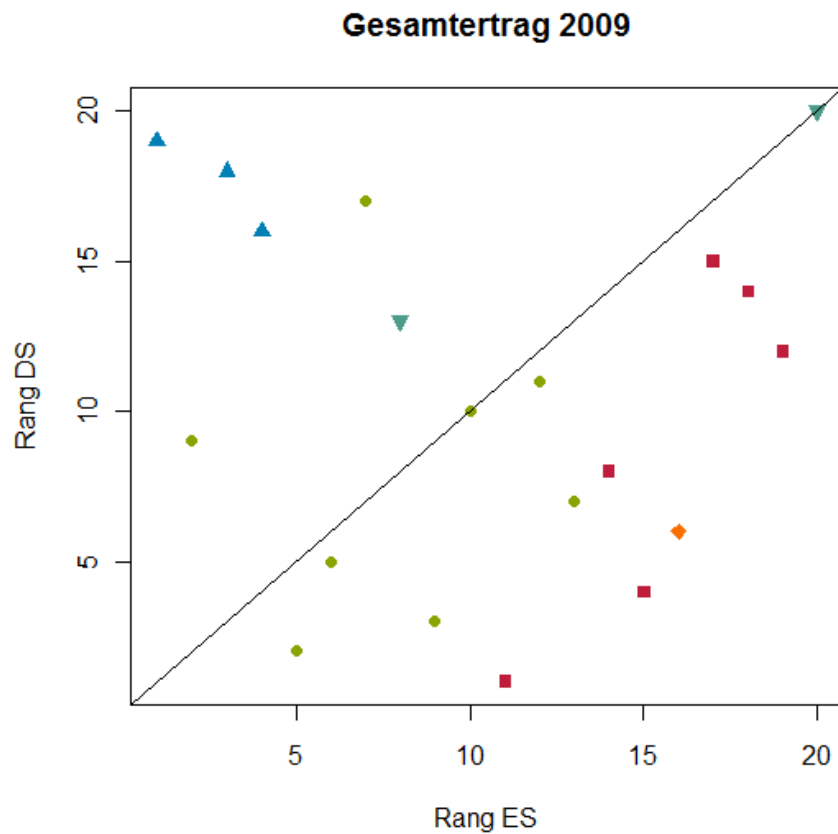


Abbildung 2.12.: Ränge der *L. perenne*-Sorten in der einheitlichen (ES) und differenzierten (DS) Schnittvariante hinsichtlich ihres Gesamtertrages im ersten Hauptnutzungsjahr. Sorten der frühen Erntegruppe werden durch blaue Dreiecke, Sorten der mittleren Erntegruppe durch grüne Kreise und Sorten der späten Erntegruppe durch rote Quadrate repräsentiert. Frühe mittlere Sorten und die späte mittlere Sorte werden durch türkise nach unten zeigende Dreiecke bzw. orange Rauten repräsentiert.

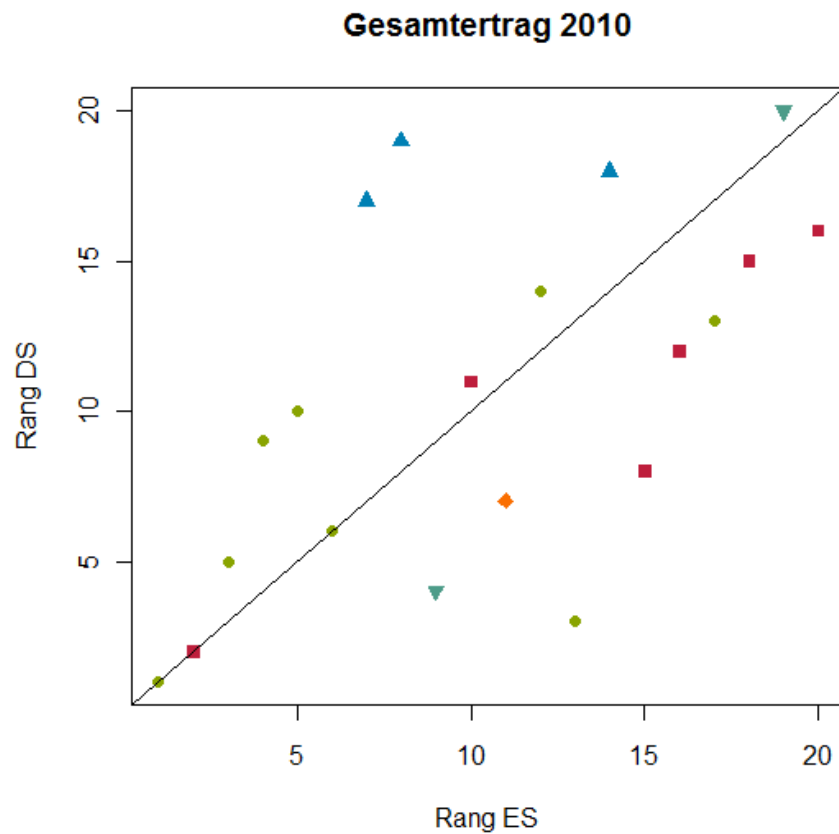


Abbildung 2.13.: Ränge der untersuchten *L. perenne*-Sorten in der einheitlichen (ES) und differenzierten (DS) Schnittvariante hinsichtlich ihres Gesamtertrages im zweiten Hauptnutzungsjahr. Sorten der frühen Erntegruppe werden durch blaue Dreiecke, Sorten der mittleren Erntegruppe durch grüne Kreise und Sorten der späten Erntegruppe durch rote Quadrate repräsentiert. Frühe mittlere Sorten und die späte mittlere Sorte werden durch türkise nach unten zeigende Dreiecke bzw. orange Rauten repräsentiert.

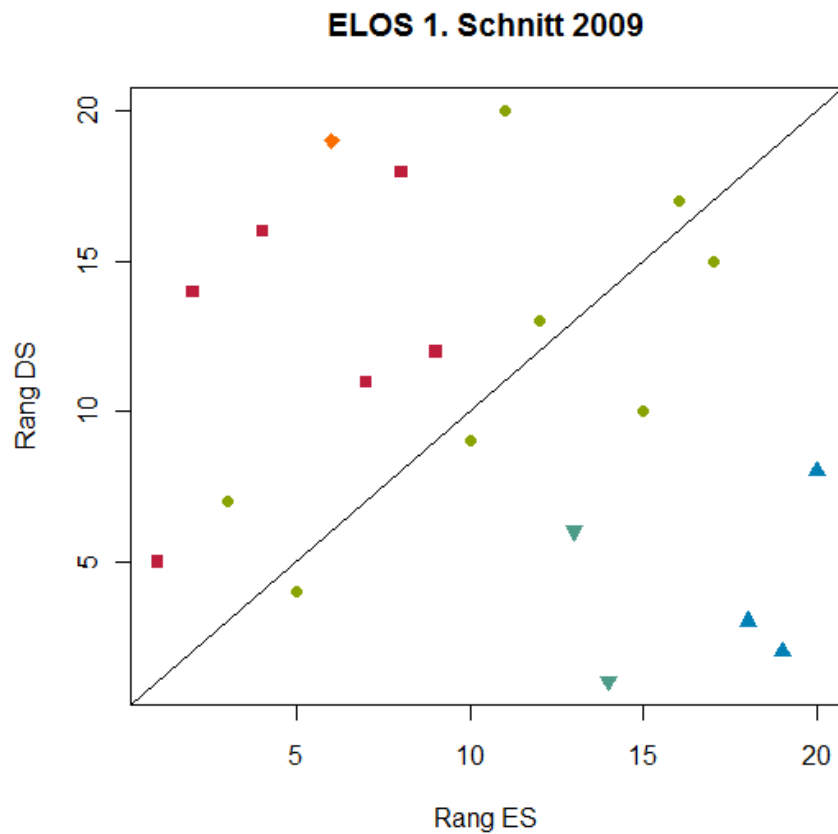


Abbildung 2.14.: Ränge der untersuchten *L. perenne*-Sorten in der einheitlichen (ES) und differenzierten (DS) Schnittvariante hinsichtlich ihrer ELOS-Gehalte im ersten Schnitt 2009. Sorten der frühen Erntegruppe werden durch blaue Dreiecke, Sorten der mittleren Erntegruppe durch grüne Kreise und Sorten der späten Erntegruppe durch rote Quadrate repräsentiert. Frühe mittlere Sorten und die späte mittlere Sorte werden durch türkise nach unten zeigende Dreiecke bzw. orange Rauten repräsentiert.

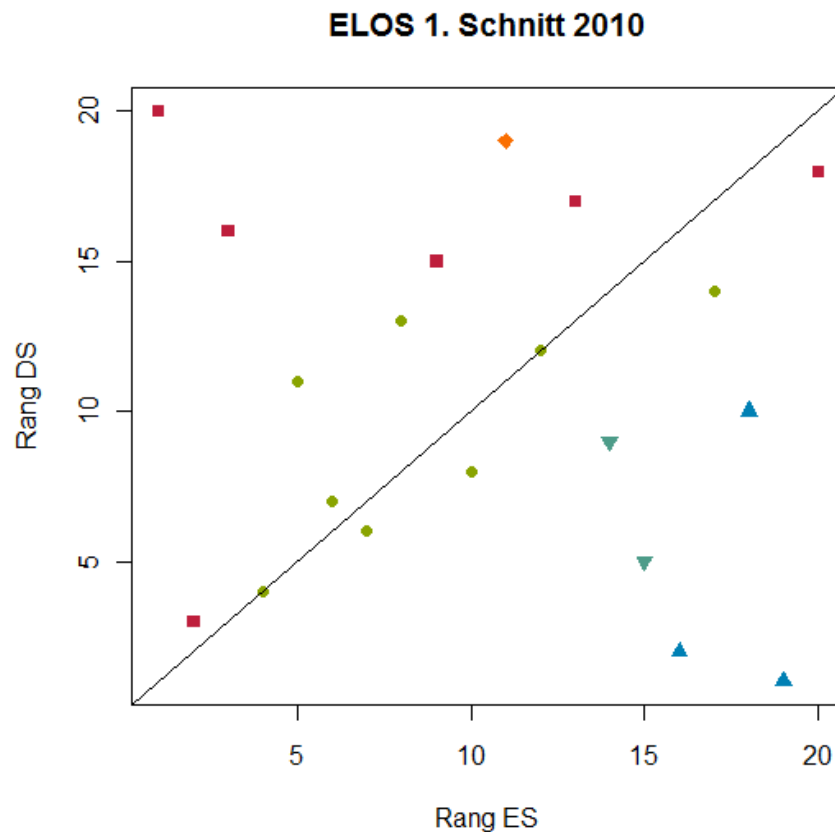


Abbildung 2.15.: Ränge der *L. perenne*-Sorten in der einheitlichen (ES) und differenzierten (DS) Schnittvariante hinsichtlich ihrer ELOS-Gehalte im ersten Schnitt 2010. Sorten der frühen Erntegruppe werden durch blaue Dreiecke, Sorten der mittleren Erntegruppe durch grüne Kreise und Sorten der späten Erntegruppe durch rote Quadrate repräsentiert. Frühe mittlere Sorten und die späte mittlere Sorte werden durch türkise nach unten zeigende Dreiecke bzw. orange Rauten repräsentiert.

2.4. Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der durchgeführten statistischen Analysen haben gezeigt, dass, über alle Orte, der Schnittzeitpunkt bzw. die Schnittvariante im ersten Schnitt beider Hauptnutzungsjahre hauptsächlich Ertrag und Qualität der frühen (Reifezeit ≤ 48 Tage nach 1. April) und späten (Reifezeit ≥ 58 Tage nach 1. April) Sorten signifikant beeinflusst hat. Auf Grund ihrer Reifezeit lagen die Schnitttermine in der einheitlichen und diffe-

renzierten Schnittvariante für diese Sorten am weitesten auseinander und hatten somit größere Auswirkungen auf den TM-Ertrag und die Qualitätsmerkmale TS-, ELOS-, XF- und XP-Gehalt. Deshalb sollten, um das Leistungspotential aller Sorten auszuschöpfen, frühe, mittlere und späte *L. perenne*-Sorten zu unterschiedlichen Terminen geschnitten werden, wie es vom Bundessortenamt durch die Einteilung der *L. perenne*-Sorten in eine frühe, mittlere und späte Erntegruppe praktiziert wird.

Betrachtet man die TM-Erträge und ELOS-Gehalte des ersten Schnittes 2009, dem Schnitt mit der größten Differenzierung zwischen der einheitlichen und differenzierten Schnittvariante, nur für die Sorten der mittleren Erntegruppe (Abbildung 2.16 und 2.17), zeigten nur noch die früheste Sorte Lilora und die späteste Sorte Toledo deutliche Unterschiede im Ertrag und in der Qualität zwischen beiden Schnittvarianten. Dies bestätigen auch die Ergebnisse der sortenspezifischen Varianzanalysen (2.3.3). Deshalb sollten diese beiden Sorten zu einem früheren bzw. späteren Termin geschnitten werden, um auch ihr Leistungspotential auszuschöpfen.

Im Gegensatz zum ersten Schnitt hatte die Schnittvariante, über alle Orte, in keinem der beiden Hauptnutzungsjahre und für keine der untersuchten Sorten einen signifikanten Einfluss auf den Gesamtertrag.

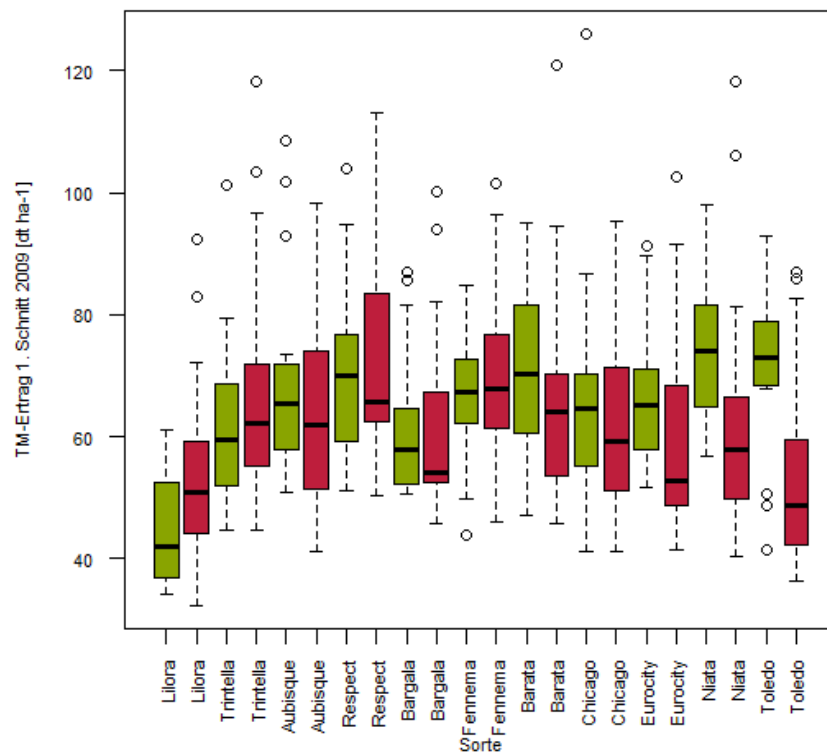


Abbildung 2.16.: TM-Erträge des ersten Schnittes 2009 der einheitlichen Schnittvariante (rot) und der differenzierten Schnittvariante (grün) der *L. perenne*-Sorten der mittleren Erntegruppe.

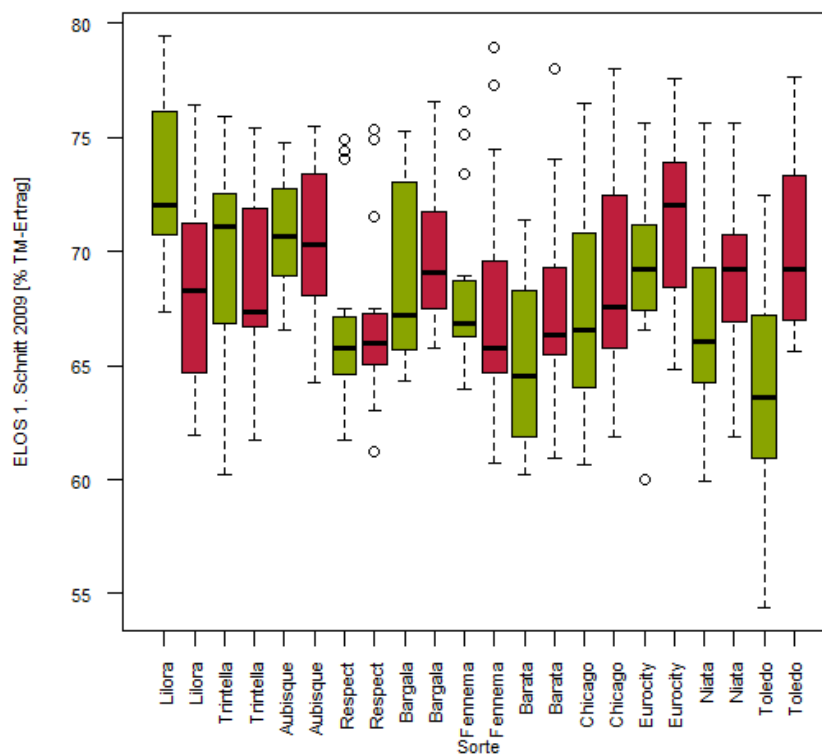


Abbildung 2.17.: ELOS-Gehalte des ersten Schnittes 2009 der einheitlichen Schnittvariante (rot) und der differenzierten Schnittvariante (grün) der *L. perenne*-Sorten der mittleren Erntegruppe.

Kapitel 3.

Ertrags- und Qualitätsmodellierung von *Lolium perenne*-Sorten zur Bestimmung des optimalen Schnittzeitpunkts für die Biogasproduktion

3.1. Einleitung

Bei der Produktion von Biogas aus Gras sind der Grasertrag und die Grasqualität die wichtigsten Einflussgrößen (PROCHNOW et al., 2009). Beide hängen vom phänologischen Entwicklungsstadium der Gräser ab und verändern sich im Laufe eines Aufwuchses: Während der Biomasseertrag zunimmt, nehmen die Verdaulichkeit und der rohstoffspezifische Methanertrag mit fortschreitendem Entwicklungsstadium ab (BUXTON, 1996; MCENIRY und O'KIELY, 2013). Somit ist der Schnittzeitpunkt ein entscheidender Faktor für die Biogasproduktion. Da sich *L. perenne*-Sorten in ihrer Reifezeit um bis zu 43 Tage unterscheiden (BUNDESSORTENAMT, 2011), ist der optimale Schnittzeitpunkt sortenspezifisch und kann anhand der Ertrags- und Qualitätsentwicklung bestimmt werden.

In diesem Kapitel soll mit Hilfe eines Modells für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung von *L. perenne*-Sorten der optimale Schnittzeitpunkt für die Bio-

gasproduktion bestimmt werden. Da der optimale Schnittzeitpunkt sortenspezifisch ist, wurde ein Modell benötigt, das eine sortenspezifische Parametrisierung zulässt. Die Identifikation sortenspezifischer Parameter kann mit einem Modell erreicht werden, das eine angemessene Anzahl Parameter enthält, die nicht korrelieren. Dazu sollten nur die für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung dominanten Prozesse in das Modell integriert werden, wobei angenommen wurde, dass Umweltprozesse den dominantesten Einfluss auf Ertrag und Qualität der Sorten haben, möglicherweise sogar nur einzelne.

Bereits existierende Graswachstumsmodelle erfüllen diese Anforderung nicht. Sie wurden entsprechend ihrer Zielsetzung entwickelt und beinhalten eine Vielzahl von Prozessen und Parametern. Die meisten dieser Modelle wurden für die Anwendung im Bereich Farmmanagement und Decision Support entwickelt (BARRETT et al., 2005; HERRMANN et al., 2005; JOHNSON und THORNLEY, 1983). Andere Modelle zielten auf Verbesserungen in der Gräserzüchtung (HERRMANN und SCHACHTEL, 2001) oder die quantitative Bewertung der Landnutzung (SCHAPENDONK et al., 1998) ab. Das Ziel dieser Modelle war es, möglichst viele Prozesse zu berücksichtigen, die das Graswachstum und die Grasqualität während des gesamten Jahres beeinflussen. Dies führte zu komplexen Modellen mit einer Vielzahl von Parametern. Im Gegensatz zu diesen bereits existierenden Modellen wurde in dieser Arbeit ein Modell angestrebt, das sortenspezifische Parameter für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätssimulation beinhaltet. Dafür ist ein möglichst einfaches Modell vorteilhaft, das nur die Parameter beinhaltet, die notwendig sind, um die Sortenspezifität zu erklären. Um ein solches Modell zu entwickeln, wurden lediglich die Prozesse Biomassewachstum, Temperaturresponse, Globalstrahlungsresponse und Bodenfeuchteresponse berücksichtigt. Mit Hilfe von Techniken zur Modellselektion wurden die Umweltprozesse identifiziert, die in den einzelnen Erntejahren und Aufwüchsen für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung dominant waren. Da der flächenspezifische Methanertrag mit dem Trockenmasseertrag korreliert (HERRMANN et al., 2012; MCENIRY und O'KIELY, 2013; PROCHNOW et al., 2009), lag der Schwerpunkt des in dieser Arbeit entwickelten Modells auf der Zeitspanne zwischen Wachstumsbeginn und dem Erreichen des maximalen Trockenmasseertrages. Aus diesem Grund wurden weder Seneszenz (JOHNSON und THORNLEY, 1983; JOUVEN et al., 2006) noch Dormanz (MOORE et al., 1997) ins Modell integriert. Im Gegensatz zu anderen Modellen, die zwischen funktionellen Pflanzenteilen unterscheiden (HERRMANN und SCHACHTEL, 2001; JOHNSON und THORNLEY, 1983; JOUVEN et al., 2006; MOORE et al., 1997; SCHAPENDONK et al., 1998), wurde außerdem die Anzahl der Modellkompartimen-

te auf zwei beschränkt: eines für den Trockenmasseertrag und eines für die unverdauliche Rohfaser. Dies entspricht der vorgenommenen Definition des verdaulichen Ertrages als Differenz aus diesen beiden Kompartimenten. Dabei wurden die unverdaulichen Faserarten unter der Rohfaserfraktion subsumiert, um ein einfaches Modell zu erhalten, das für die Analyse der Sortenspezifität geeignet ist.

Im Folgenden wurde zuerst untersucht, welche Umweltprozesse notwendig waren, um die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung zu modellieren. Des Weiteren wurde untersucht, ob die sortenspezifischen Modellparameter Sortenmerkmale, wie z.B. die Reifezeit, widerspiegeln. Schließlich wurde der modellbasiert ermittelte optimale Schnitzeitpunkt für die Biogasproduktion mit dem für die Futterproduktion üblichen Schnitzeitpunkt verglichen.

3.2. Material und Methoden

Als sortenspezifisch optimaler Schnitzeitpunkt für die Biogasproduktion wurde der Zeitpunkt der maximalen Differenz zwischen Trockenmasse (TM)-Ertrag und absolutem Rohfaser (XF)-Gehalt bzw. der Zeitpunkt des maximalen verdaulichen Ertrages angenommen. Daher wurde ein Modell für den TM-Ertrags- und XF-Verlauf entwickelt. Der Feldversuch wurde zum Einen durchgeführt, um die Annahmen zum sortenspezifisch optimalen Schnitzeitpunkt zu verifizieren, und zum Anderen zur Modellparametrisierung.

3.2.1. Verifikation des sortenspezifisch optimalen Schnitzeitpunkts

Um den angenommenen optimalen Schnitzeitpunkt für die Biogasproduktion zu verifizieren, wurde für jeden Erntetermin und jede Sorte aus der enzymlöslichen organischen Substanz (ELOS) und Rohasche (XA) der flächenspezifische Methanertrag ($l_N \text{ CH}_4 \text{ m}^{-2}$) berechnet (WEISSBACH, 2008) und mit der Differenz zwischen TM-Ertrag und absolutem XF-Gehalt verglichen. Die Bestimmung der ELOS- und XF-Gehalte erfolgte mittels Nahinfrarotspektroskopie (NIRS), während die XA-Konzentrationen im Labor analysiert wurden.

3.2.2. Modellbeschreibung

Das Modell umfasst konstitutive Gleichungen für den TM-Ertrag und den absoluten XF-Gehalt. Die Modellierung des TM-Ertrages (kg m^{-2}) basiert auf einem logistischen Wachstum mit der Wachstumsrate r_{\max} (d^{-1}) und dem Ertragsmaximum y_{\max} (kg m^{-2}). Zusätzlich beinhaltet das Ertragsmodell die Umweltresponse ϕ , die eine Temperaturreponse ϕ_T , eine Bodenfeuchteresponse ϕ_M , eine Globalstrahlungsresponse ϕ_R oder eine Kombination aus ihnen sein kann:

$$\frac{dy}{dt} = r_{\max} \cdot \phi \cdot y \left(1 - \frac{y}{y_{\max}} \right) \quad \text{mit } y(0) = y_0 \quad (3.1)$$

Die Response auf die Temperatur T nach O'Neill (SPAIN, 1982) ist von der Optimumstemperatur T_{opt} und dem Temperaturkoeffizienten Q_{10} abhängig. Letzterer repräsentiert den Faktor, mit dem das Wachstum bei einer Temperaturerhöhung um 10°C zunimmt. Die Werte 400 und 40 sind Shape-Werte für p , während p und J als Platzhalter für eine bessere Lesbarkeit dienen:

$$\phi_T(T) = \left(\frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\text{opt}}} \right)^p \exp \left(p \frac{T - T_{\text{opt}}}{T_{\max} - T_{\text{opt}}} \right) \quad \text{mit} \quad (3.2)$$

$$p = \frac{1}{400} J^2 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{40}{J}} \right)^2 \quad \text{und}$$

$$J = (Q_{10} - 1)(T_{\max} - T_{\text{opt}})$$

Die Response auf die Bodenfeuchte M ist eine Weibullverteilung mit der kritischen Bodenfeuchte für Wassermangel M_{crit} und dem Shape-Parameter γ . Die eingelesenen Daten für M sind Bodenfeuchtedaten in Prozent nutzbare Feldkapazität (nFK), was als Differenz zwischen aktueller Wasserversorgung und Welkepunkt geteilt durch die Differenz zwischen Feldkapazität und Welkepunkt definiert ist. Die Bodenfeuchtedaten wurden mit Hilfe des Wasserbilanzmodells AMBAV (FRIESLAND und LÖPMEIER, 2007) anhand von Bodenparametern, wie z.B. Feldkapazität, Welkepunkt und Bodendichte, Referenzpflan-

zenparametern für Grünland, wie z.B. Pflanzenhöhe, Blattflächenindex und Durchwurzelungstiefe, und den Wetterdaten Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Verdunstung, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und Wolkenbedeckung berechnet:

$$\phi_M = 1 - \exp\left(-\left(\frac{M}{M_{crit}}\right)^\gamma\right) \quad (3.3)$$

Die Response auf die Globalstrahlung R ist eine Sättigungsfunktion mit der Globalstrahlung bei Lichtsättigung der Pflanzendecke R_{max} und dem Shape-Parameter β (HERRMANN et al., 2005):

$$\phi_R = \frac{1 - \exp(-\beta \frac{R}{R_{max}})}{1 - \exp(-\beta)} \quad (3.4)$$

Das Qualitätsmodell ist an das Ertragsmodell gekoppelt. Die Veränderung des absoluten XF-Gehaltes y_F (kg m^{-2}) ist definiert als:

$$\frac{dy_F}{dt} = \theta_F \cdot (y - y_F) \quad \text{mit } y(0) = y_0 \quad (3.5)$$

und der XF-Neubildungsrate θ_F , mit der die Bildungsrate von unverdaulicher XF aus verdaulicher Nicht-XF bezeichnet wird.

Für die tägliche Eingabe der Umweltbedingungen in das Modell wurde ein maximaler Zeitschritt von einem Tag gewählt.

3.2.3. Versuche

An vier Standorten in Deutschland mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften (Tabelle 3.1) und Wetterbedingungen (Abbildung 3.1) wurde ein Feldversuch durchgeführt. An allen Standorten wurden acht *L. perenne*-Sorten mit unterschiedlicher Reifezeit (Tabelle 3.2) für zwei Jahre in einer randomisierten Blockanlage mit zwei Wiederholungen angebaut. In jedem Erntejahr wurden vor dem ersten und zweiten Schnitt 80 kg N und vor

Tabelle 3.1.: Lage und Bodeneigenschaften der Versuchsstandorte Asendorf, Braunschweig, Malchow und Steinach.

Standort	Geografische Koordinaten	Bodenart
Asendorf (As)	52,8°(N) 9,0°(E)	sL
Braunschweig (Br)	52,3°(N) 10,5°(E)	IS
Malchow (Ma)	53,5°(N) 12,4°(E)	IS
Steinach (St)	50,4°(N) 11,2°(E)	L

dem dritten Schnitt 60 kg N pro ha appliziert. Am Standort Braunschweig wurde die Versuchsfläche während der Trockenperioden im Frühjahr und Sommer mit 30 mm beregnet. An allen Versuchsstandorten wurden im ersten (H_1) und zweiten Hauptnutzungsjahr (H_2) Zeitreihenernten durchgeführt, die den ersten (a) und dritten Schnitt (b) mit jeweils zehn Ernteterminen im Abstand von vier bis fünf Tagen erfassten. An jedem Erntetermin wurden das Entwicklungsstadium jeder Sorte nach der allgemeinen BBCH-Skala (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und CHemische Industrie, MEIER, 1997), der TM-Ertrag sowie XF-, XA- und ELOS-Gehalt (NAUMANN und BASSLER, 1976) bestimmt. Die Bestimmung des TM-Ertrages erfolgte gravimetrisch durch Trocknung frischen Pflanzenmaterials bei 105°C. Zur Schätzung der XF- und ELOS-Konzentrationen wurde Pflanzenmaterial bei 60°C Ofen-getrocknet, auf 1 mm vermahlen und mit einem Foss 5000 NahInfRarotSpektrophometer (NIRS) (Foss GmbH, Hamburg, Deutschland) vermessen. Die Schätzungen erfolgten dabei auf Basis einer gut fundierten, über viele Jahre gepflegten NIRS-Kalibration (Tabelle 3.3), wobei die Schätzung der XF-Gehalte auf der Analyse nach der Weender-Methode basierte (NAUMANN und BASSLER, 1976) und die der ELOS-Gehalte auf der Analyse mittels Cellulase (NAUMANN und BASSLER, 1976). Zur Validierung der NIRS-Daten wurden Stichprobensets von etwa 10% der Proben mit Hilfe der oben genannten nass-chemischen Verfahren im Labor analysiert (Tabelle 3.4). Dazu wurde ebenfalls bei 60°C getrocknetes und auf 1 mm vermahlenes Pflanzenmaterial verwendet. XA-Konzentrationen wurden durch Veraschung des Pflanzenmaterials bei 550°C bestimmt (NAUMANN und BASSLER, 1976). Zusätzlich zu den Ertrags- und Qualitätsdaten wurden von jedem Standort die Tagesmitteltemperaturen, die Globalstrahlung und die berechnete Bodenfeuchte erfasst (Abbildung 3.1).

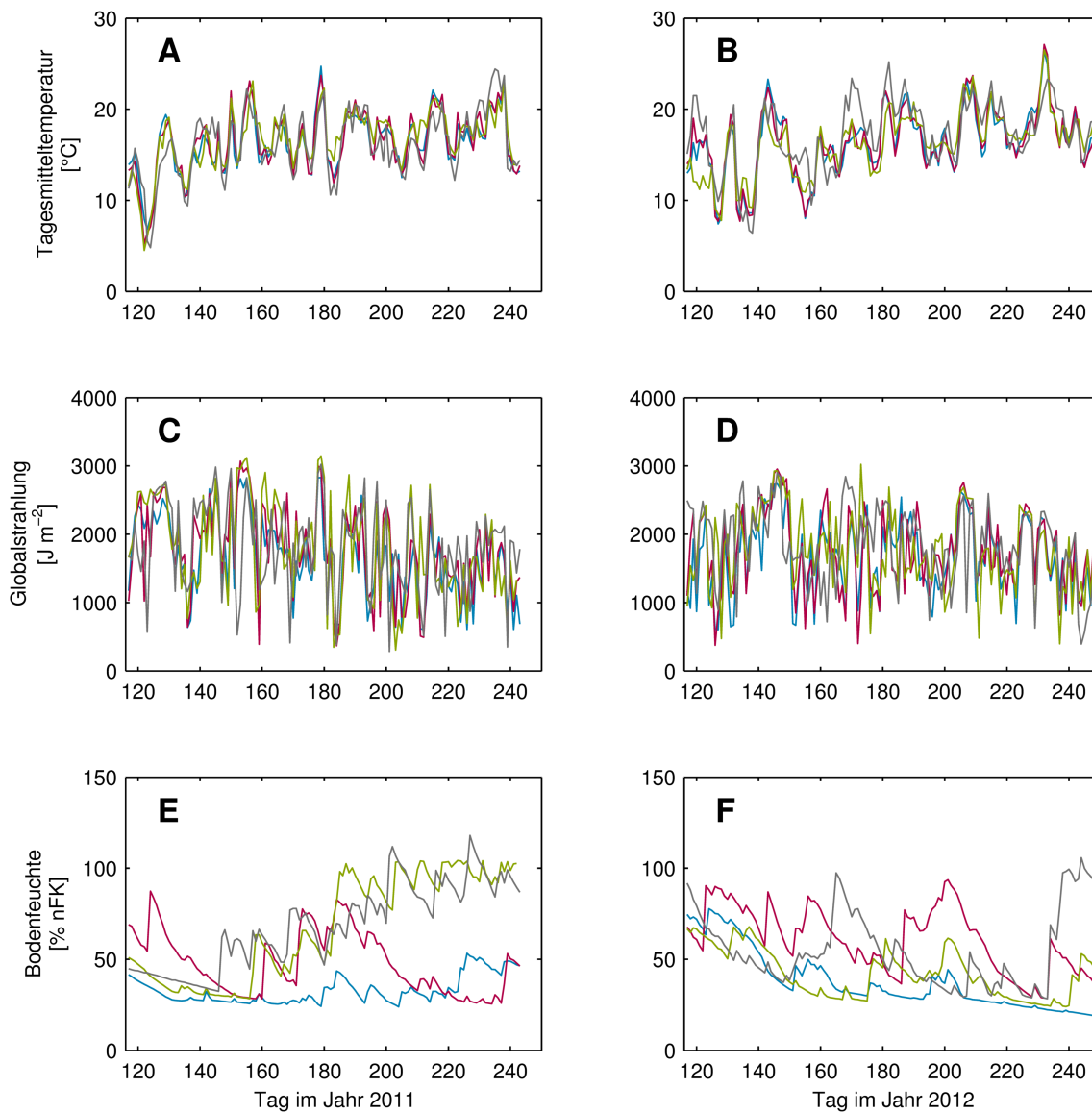


Abbildung 3.1.: Umweltbedingungen Tagesmitteltemperatur (A, B), Globalstrahlung (C, D) und Bodenfeuchte (E, F) der Ernteperioden 2011 und 2012 an den Standorten Asendorf (blau), Braunschweig (rot), Malchow (grün) und Steinach (grau).

3.2.4. Modellauswahl

Um die Umweltprozesse zu identifizieren, die notwendig waren, um die sortenspezifische Ertragsentwicklung zu erklären, wurde das Akaike Informationskriterium (AIC) (AKAIKE, 1978) verwendet:

Tabelle 3.2.: Angebaute *L. perenne*-Sorten, ihre Reifezeit und Erntegruppe (BUNDES-SORTENAMT, 2009).

Sorte	Beginn Ährenschieben [Tage nach 1.4.]	Erntegruppe
Aberavon (Aba)	59	spät
Abersilo (Abs)	46	früh
Aubisque (Aub)	50	mittel
Bargala (Bar)	52	mittel
Fennema (Fen)	52	mittel
Lipresso (Lip)	41	früh
Respect (Res)	51	mittel
Sponsor (Spo)	63	spät

Tabelle 3.3.: Statistik der NIRS-Kalibration für Rohfaser (XF) und die enzymlösliche organische Substanz (ELOS) mit der Anzahl der Spektren in der Kalibration n , ihrer Mittelwerte Mean, Standardabweichungen SD, Standardfehlern der Kalibration SEC, Bestimmtheitsmaßen der Kalibration RSQ, Standardfehlern bei Cross-Validation SEC(V) und Bestimmtheitsmaßen bei Cross-Validation 1-VR.

Inhaltsstoff	n	Mean [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	SD [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	SEC [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	RSQ	SEC(V) [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	1-VR [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]
XF	946	23,09	4,29	0,71	0,97	0,75	0,97
ELOS	230	63,30	8,04	1,86	0,95	2,31	0,92

Tabelle 3.4.: Statistik der NIRS-Validation für Rohfaser (XF) und die enzymlösliche organische Substanz (ELOS) mit der Anzahl der Validationproben n , Mittelwerten der Labor- und NIRS-Proben Mean, Standardabweichungen innerhalb der Laborwerte SD, Standardfehlern der Validation SEP, Bias, SEP korrigiert um den Bias SEP(C), Steigungen der Regressionsgerade S, Bestimmtheitsmaßen der Validation RSQ(P) und Standardabweichungen der Laborwerte/Standardfehler der Validation RPD.

Inhaltsstoff	n	Mean [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	SD [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	SEP [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	Bias [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	SEP(C) [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	S [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]	RSQ(P)	RPD [% TM]/ [g kg TM ⁻¹]
XF vs. XF	70	26,90	5,04	1,37	0,50	1,28	0,93	0,94	3,68
ELOS vs. ELOS	69	61,14	10,63	5,34	-0,52	5,35	0,81	0,79	1,99

$$AIC_R = n \log \frac{\sum r^2}{n} + 2k \quad (3.6)$$

mit Stichprobenumfang n , Residuen r und Anzahl der geschätzten Parameter k . Die AIC-Werte wurden für jede Kombination der Umweltprozesse Temperatur, Globalstrahlung und Bodenfeuchte berechnet. Die Umweltprozesse, für die sich die niedrigsten AIC-Werte ergaben, wurden in das Modell integriert. Zur Bewertung der Modellgüte wurde für jede Sorte und für das Ertragsmodell mit verschiedenen integrierten Umweltprozessen der Nash-Sutcliffe-Koeffizient E (NASH und SUTCLIFFE, 1970) berechnet, welcher einen Wertebereich von $-\infty$ bis 1 aufweist.

3.2.5. Modellparametrisierung

Die Parameter r_{\max} , Q_{10} , β , γ und θ_F sowie die Anfangsbedingung y_0 wurden mit Hilfe eines lokalen Optimierungsalgorithmus von Matlab 2011b (Mathworks®, Natick, Massachusetts) auf Basis der experimentellen Ertrags- und Rohfaserdaten beider Hauptnutzungsjahre geschätzt. Die Anpassungen erfolgten sortenweise für alle Standorte gemeinsam. Auf Grund des signifikanten Einflusses des Aufwuchses und des Hauptnutzungsjahres auf Ertrag und Qualität (siehe Tabelle 3.5), bedingt durch die Auswirkungen der vorherigen Schnitte, wurden die sortenspezifischen Parameter für die Versuche H_{1a}, H_{1b}, H_{2a} und H_{2b} separat angepasst. Als Ertragsmaximum y_{\max} wurden die gemessenen sorten- und ortsspezifischen maximalen TM-Erträge eingesetzt. Die alternative Vorgehensweise wäre gewesen, einen Parameter α einzuführen, der sortenspezifisch aber für alle Standorte konstant ist, via:

$$y_{\max} = r_{\max} \phi / \alpha$$

Allerdings korreliert dieser Parameter bekanntermaßen zu Beginn des Aufwuchses, dem Zeitraum, der hier besonders beleuchtet werden sollte, mit der Wachstumsrate r_{\max} . Der stattdessen gewählte Ansatz erlaubt es, den Einfluss der Umwelt auf den maximalen Ertrag zu integrieren, ohne einen Parameter einzuführen, der schwierig zu identifizieren ist. Für die kritische Bodenfeuchte M_{crit} wurde ein empirischer Wert für Wassermangel des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Braunschweig genutzt (DWD, 2014), der 30% nFK betrug. Für die Globalstrahlung bei Lichtsättigung der Pflanzendecke R_{\max}

wurde ein Wert eingesetzt, der im Ertrags- und Qualitätsmodell FOPROQ (FORage PROduction Quality, HERRMANN et al., 2005) benutzt wird und 3200 J cm^{-2} beträgt. Bezüglich der Optimumtemperatur T_{opt} war es nicht sinnvoll, für alle Sorten einen einheitlichen Wert anzunehmen. Deshalb wurden Klassen von $15\text{-}23^\circ\text{C}$ erstellt und der Temperaturkoeffizient Q_{10} auf Werte zwischen 1,7 und 2,3 festgesetzt. Anhand des Nash-Sutcliffe-Koeffizienten konnten die Sorten hinsichtlich ihrer Optimumtemperatur klassifiziert werden. Während jedoch für die Bodenfeuchte und die Globalstrahlung ein Vergleich der für die *L. perenne*-Sorten geschätzten Shape-Parameter sinnvoll ist, ist dies für Q_{10} nur begrenzt der Fall. Um Unterschiede zwischen den sortenspezifisch geschätzten Wachstumsraten r_{max} zu untersuchen, wurden anhand der Standardabweichungen Konfidenzintervalle berechnet.

3.3. Ergebnisse

Im Folgenden wird zunächst die Entwicklung des verdaulichen Ertrages mit der Entwicklung des flächenspezifischen Methanertrages verglichen. Anschließend werden die Umweltbedingungen vorgestellt, die anhand des AIC zur Integration in das Ertragsmodell ausgewählt wurden, dabei wird auch die Modellgüte betrachtet. Danach wird auf die geschätzten sortenspezifischen Modellparameter eingegangen, insbesondere auf ihren Zusammenhang mit der Reifezeit der Sorten. Schließlich wird der modellbasiert optimale Schnitzeitpunkt jeder Sorte mit dem für die Futterproduktion üblichen Schnitzeitpunkt verglichen.

3.3.1. Vergleich maximal verdaulicher Ertrag und Methanertrag

Für jede Sorte und an jedem Standort wurde der maximale verdauliche Ertrag bzw. die maximale Differenz aus TM-Ertrag und XF zur selben Zeit erreicht, als auch der Methanertrag maximal war (siehe Abbildung 3.2 für die Sorte Abersilo als ein Beispiel). Dabei wurden der maximale verdauliche Ertrag und der maximale Methanertrag im ersten Aufwuchs von allen Sorten nach dem üblichen Schnitzeitpunkt für Futtergras, dem Entwicklungsstadium „Beginn des Ährenschiebens“ erreicht (siehe 3.3.4).

Tabelle 3.5.: F -Werte und Signifikanzniveaus der Faktoren Jahr, Ort, Aufwuchs, Schnittzeitpunkt, Sorte und ihrer Wechselwirkungen für den Trockenmasse (TM)-Ertrag und den absoluten Rohfaser (XF)-Gehalt in den Erntejahren 2011 und 2012, berechnet mit fünffaktoriellen ANOVAs.

Varianzursache	df	F -Wert	
		TM	XF
Jahr	1	1230,9***	502,7***
Ort	3	412,9***	467,9***
Aufwuchs	1	7753,4***	698,2***
Schnittzeitpunkt	1	11855,4***	17010,7***
Sorte	7	22,9***	89,5***
Jahr:Ort	3	843,1***	118,6***
Jahr:Aufwuchs	1	305,4***	345,4***
Ort:Aufwuchs	3	126,9***	49,5***
Jahr:Schnittzeitpunkt	1	136,4***	181,0***
Ort:Schnittzeitpunkt	3	14,8***	77,7***
Aufwuchs:Schnittzeitpunkt	1	3504,8***	6190,4***
Jahr:Sorte	7	3,1**	1,3
Ort:Sorte	21	3,1***	2,4***
Aufwuchs:Sorte	7	29,1***	40,9***
Schnittzeitpunkt:Sorte	7	5,2***	5,8***
Jahr:Ort:Aufwuchs	3	31,6***	92,1***
Jahr:Ort:Schnittzeitpunkt	3	87,9***	9,7***
Jahr:Aufwuchs:Schnittzeitpunkt	1	32,5***	10,8**
Ort:Aufwuchs:Schnittzeitpunkt	3	9,4***	24,4***
Jahr:Ort:Sorte	21	1,3	1,8*
Jahr:Aufwuchs:Sorte	7	1,0	1,7
Ort:Aufwuchs:Sorte	21	1,7*	3,4***
Jahr:Schnittzeitpunkt:Sorte	7	1,2	3,4*
Ort:Schnittzeitpunkt:Sorte	21	1,5.	3,0**
Aufwuchs:Schnittzeitpunkt:Sorte	7	3,1**	9,0***
Jahr:Ort:Aufwuchs:Schnittzeitpunkt	3	15,9***	56,2***
Jahr:Ort:Aufwuchs:Sorte	21	1,3	2,1.
Jahr:Ort:Schnittzeitpunkt:Sorte	21	0,7	1,2
Jahr:Aufwuchs:Schnittzeitpunkt:Sorte	7	0,9	0,9
Ort:Aufwuchs:Schnittzeitpunkt:Sorte	21	1,1	1,7
Jahr:Ort:Aufwuchs:Schnittzeitpunkt:Sorte	21	0,4	1,6

. $P < 0,1$; * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$

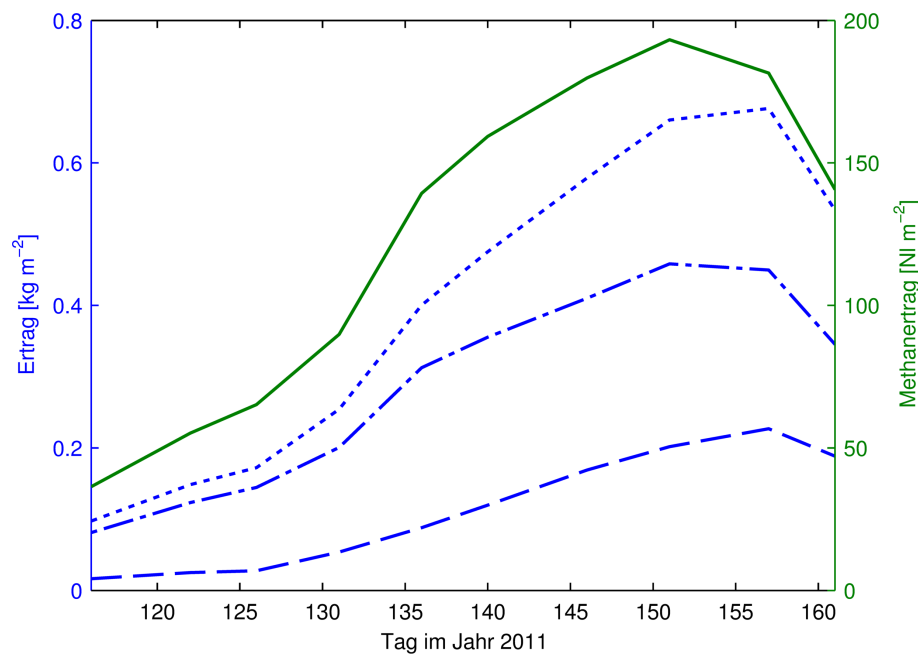


Abbildung 3.2.: Trockenmasse (TM)-Ertrag (gepunktete Linie), Rohfaser (XF) (gestrichelte Linie), Differenz aus TM-Ertrag und XF (Strich-Punkt-Linie) und Methanertrag (durchgezogene Linie) der Sorte Abersilo am Standort Braunschweig während des ersten Aufwuchses 2011.

3.3.2. Auswahl der integrierten Umweltbedingungen und Modellgüte

Für die vier Versuche H_{1a} , H_{1b} , H_{2a} und H_{2b} wurden anhand des AIC unterschiedliche Umweltresponen zur Erklärung der sortenspezifischen Ertragsentwicklung ausgewählt. Für die Ertragsdaten des ersten Schnittes im ersten Hauptnutzungsjahr H_{1a} wurde das Modell mit einer Temperatur- und einer Bodenfeuchteresponse ausgewählt (Tabelle 3.6), während für die Daten des ersten Schnittes im zweiten Hauptnutzungsjahr H_{2a} das Modell mit einer Temperatur- und einer Strahlungsresponse ausgewählt wurde. Für den dritten Schnitt des ersten Hauptnutzungsjahres H_{1b} wurde das Modell ohne Umweltprozesse ausgewählt, während für den dritten Schnitt des zweiten Hauptnutzungsjahres H_{2b} das Ertragsmodell mit einer Bodenfeuchteresponse ausgewählt wurde. Die ausgewählten Modelle für die sortenspezifische Entwicklung des verdaulichen Ertrages konnten gut an die gemessenen Ertrags- und Rohfaserdaten beider Hauptnutzungsjahre und aller Standorte angepasst werden (siehe Abbildung 3.3 und 3.4 als ein Beispiel). Allerdings wurde der maximale verdauliche Ertrag generell vom Modell unterschätzt, während der verdau-

liche Ertrag einzelner Sorten an einzelnen Standorten zeitweise überschätzt wurde (z.B. Abbildung 3.3 B, Standort Asendorf). Für alle vier Versuche war der Nash-Sutcliffe-Koeffizient E , berechnet für jede Sorte und über alle Standorte, $\geq 0,99$. Die für jede Sorte und jeden Standort einzeln berechneten Koeffizienten betrugen im Mittel 0,95 für H_{1a} , 0,85 für H_{1b} , 0,95 für H_{2a} und 0,71 für H_{2b} . Für das Modell mit allen drei Umweltprozessen betrug der Nash-Sutcliffe-Koeffizient, berechnet für jede Sorte und über alle Standorte, ebenfalls $\geq 0,99$. Die für jede Sorte und jeden Standort einzeln berechneten Koeffizienten betrugen im Mittel 0,94 für H_{1a} , 0,81 für H_{1b} , 0,94 für H_{2a} und 0,68 für H_{2b} .

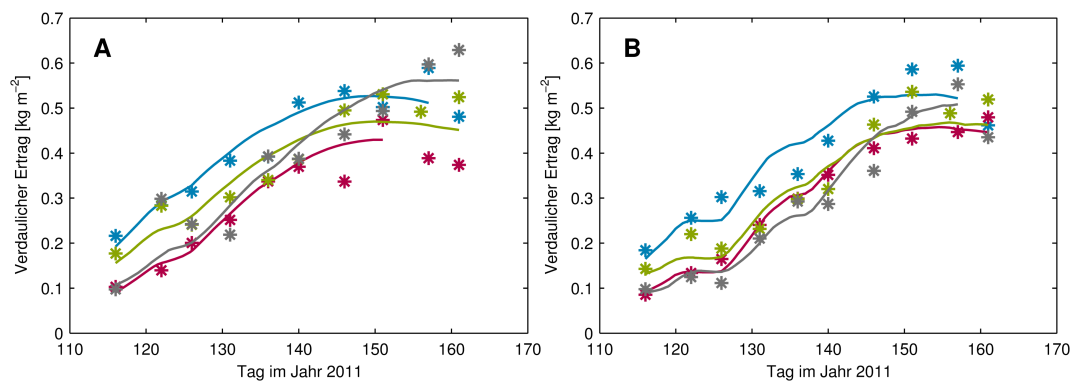


Abbildung 3.3.: Modellierte (Linien) und gemessene (Symbole) verdauliche Erträge der frühen Sorte Lipresso (A) und der späten Sorte Sponsor (B) des ersten Schnittes 2011 (H_{1a}) an den Standorten Asendorf (blau), Braunschweig (rot), Malchow (grün) und Steinach (grau).

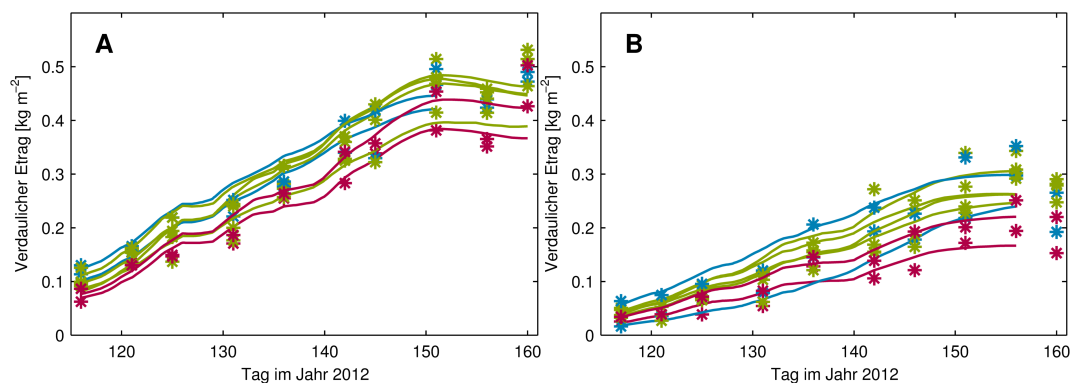


Abbildung 3.4.: Modellierte (Linien) und gemessene (Symbole) verdauliche Erträge der untersuchten Sorten des ersten Schnittes 2012 (H_{2a}) an den Standorten Braunschweig (A) und Steinach (B). Die frühen Sorten sind in blau, die mittleren in grün und die späten Sorten in rot dargestellt.

Tabelle 3.6.: AIC-Werte für das Ertragsmodell mit den Umweltprozessen Temperatur ϕ_T , Bodenfeuchte ϕ_M und/oder Globalstrahlung ϕ_R und Anpassung an die Ertragsdaten des ersten H_1 und zweiten Hauptnutzungsjahres H_2 und den ersten a und dritten Schnitt b.

Versuch	Umweltprozess	AIC-Wert
H_{1a}	-	-1796
H_{1a}	ϕ_T	-1854
H_{1a}	ϕ_M	-1778
H_{1a}	ϕ_R	-1745
H_{1a}	$\phi_T \times \phi_M$	-1863
H_{1a}	$\phi_T \times \phi_R$	-1827
H_{1a}	$\phi_M \times \phi_R$	-1721
H_{1a}	$\phi_T \times \phi_M \times \phi_R$	-1824
H_{1b}	-	-2312
H_{1b}	ϕ_T	-2298
H_{1b}	ϕ_M	-2260
H_{1b}	ϕ_R	-2290
H_{1b}	$\phi_T \times \phi_M$	-2246
H_{1b}	$\phi_T \times \phi_R$	-2275
H_{1b}	$\phi_M \times \phi_R$	-2210
H_{1b}	$\phi_T \times \phi_M \times \phi_R$	-2183
H_{2a}	-	-1952
H_{2a}	ϕ_T	-1947
H_{2a}	ϕ_M	-1932
H_{2a}	ϕ_R	-2032
H_{2a}	$\phi_T \times \phi_M$	-1929
H_{2a}	$\phi_T \times \phi_R$	-2039
H_{2a}	$\phi_M \times \phi_R$	-1988
H_{2a}	$\phi_T \times \phi_M \times \phi_R$	-2008
H_{2b}	-	-2158
H_{2b}	ϕ_T	-2140
H_{2b}	ϕ_M	-2179
H_{2b}	ϕ_R	-2125
H_{2b}	$\phi_T \times \phi_M$	-2168
H_{2b}	$\phi_T \times \phi_R$	-2101
H_{2b}	$\phi_M \times \phi_R$	-2132
H_{2b}	$\phi_T \times \phi_M \times \phi_R$	-2132

3.3.3. Geschätzte Modellparameter

Die sortenspezifischen Wachstumsraten zeigten die größten Unterschiede in H_{1a} (Tabelle 3.7). Ihr Variationskoeffizient CV betrug hier 14%. Dabei hatten die frühen Sorten niedrigere Wachstumsraten als die späteren Sorten. In H_{1b} betrug der CV der Wachstumsraten nur 7%, während er in H_{2a} 10% und in H_{2b} 9% betrug. Im Gegensatz zu H_{1a} hatten die Wachstumsraten der frühen, mittleren und späten Sorten in H_{1b} , H_{2a} und H_{2b} ähnliche Konfidenzintervalle (Tabelle 3.8), wobei in H_{2a} die niedrigsten Wachstumsraten ebenfalls für die frühen Sorten Abersilo und Lipresso und die mittlere Sorte Bargala geschätzt wurden.

In H_{1a} und H_{2a} unterschieden sich die Temperaturresponsen der frühen Sorten von denen der späteren Sorten (siehe Abbildung 3.5 A für H_{1a} als ein Beispiel). Bei niedrigen Temperaturen wurde das Wachstum der frühen Sorten Lipresso und Abersilo weniger gehemmt, als das der späteren Sorten. Umgekehrt wurde bei höheren Temperaturen das Wachstum der Sorten Lipresso und Abersilo stärker gehemmt als das der späteren Sorten. In H_{2a} wurde bei niedriger Globalstrahlung das Wachstum der mittleren Sorte Aubisque und der späten Sorten Sponsor und Abravon weniger gehemmt als das der anderen mittleren Sorten und der frühen Sorten (Abbildung 3.5 B). In H_{1a} waren die Bodenfeuchteresponsen der frühen Sorten generell niedriger als die der späteren Sorten, wobei besonders bei niedriger Bodenfeuchte das Wachstum der beiden späten Sorten und der mittleren Sorte Respect weniger gehemmt wurde als das der anderen Sorten. Auch in H_{2b} wurde bei niedriger Bodenfeuchte das Wachstum der Sorte Respect weniger gehemmt, während das der Sorte Sponsor stärker gehemmt wurde (Abbildung 3.5 C).

Die geschätzten Parameter für das Modell mit allen drei Umweltprozessen - einer Temperaturresponse, einer Globalstrahlungsresponse und einer Bodenfeuchteresponse - hatten generell größere Standardabweichungen (Tabelle B.2). Insbesondere waren die Standardabweichungen des Bodenfeuchteparameters γ in H_{2a} , der Umweltparameter in H_{1b} und des Globalstrahlungsparameters β in H_{2b} größer als die Parameter selbst. In H_{1a} und H_{2a} waren die für die frühen Sorten geschätzten Wachstumsraten und Temperaturkoeffizienten ebenfalls kleiner als die für die späteren Sorten geschätzten Wachstumsraten.

Tabelle 3.7.: Geschätzte sortenspezifische Modellparameter Optimumstemperatur T_{opt} , Wachstumsrate r_{max} , Temperaturkoeffizient Q_{10} , Bodenfeuchteparameter γ und Strahlungsparameter β des Ertragsmodells für das erste H_1 und zweite Hauptnutzungsjahr H_2 und den ersten a und dritten Schnitt b.

Sorte	$H_{1a}-H_{2b}$ T_{opt} [°C]	H_{1a} r_{max} [d ⁻¹]	H_{1a} Q_{10} [°C ⁻¹]	H_{1a} γ [% nFK ⁻¹]	H_{1b} r_{max} [d ⁻¹]	H_{2a} r_{max} [d ⁻¹]	H_{2a} Q_{10} [°C ⁻¹]	H_{2a} β [J cm ⁻²]	H_{2b} r_{max} [d ⁻¹]	H_{2b} γ [% nFK ⁻¹]
Aba	18	0,21±0,01	2,80±0,21	0,65±0,28	0,09±0,01	0,18±0,01	2,47±0,22	1,62±0,87	0,12±0,01	1,60±0,84
Abs	16	0,15±0,01	2,22±0,39	1,59±0,43	0,08±0,00	0,15±0,02	1,59±0,55	1,20±0,51	0,11±0,01	1,56±1,19
Aub	17	0,18±0,01	2,59±0,15	0,91±0,31	0,08±0,01	0,16±0,01	2,28±0,11	2,62±0,70	0,11±0,01	1,72±0,97
Bar	17	0,20±0,01	2,97±0,16	0,71±0,33	0,07±0,00	0,14±0,01	2,09±0,21	1,97±0,78	0,14±0,01	2,75±1,21
Fen	17	0,19±0,01	2,75±0,14	0,88±0,37	0,08±0,01	0,16±0,01	1,92±0,15	1,29±0,49	0,11±0,01	2,74±0,97
Lip	16	0,16±0,01	2,13±0,35	0,57±0,34	0,08±0,00	0,15±0,01	1,83±0,23	1,41±0,48	0,11±0,01	2,66±0,92
Res	17	0,22±0,01	2,99±0,19	0,43±0,25	0,08±0,00	0,18±0,01	2,08±0,20	0,52±0,45	0,13±0,01	0,93±0,84
Spo	18	0,21±0,00	2,93±0,14	0,41±0,20	0,09±0,00	0,16±0,01	2,38±0,10	2,51±0,84	0,13±0,01	3,48±0,97

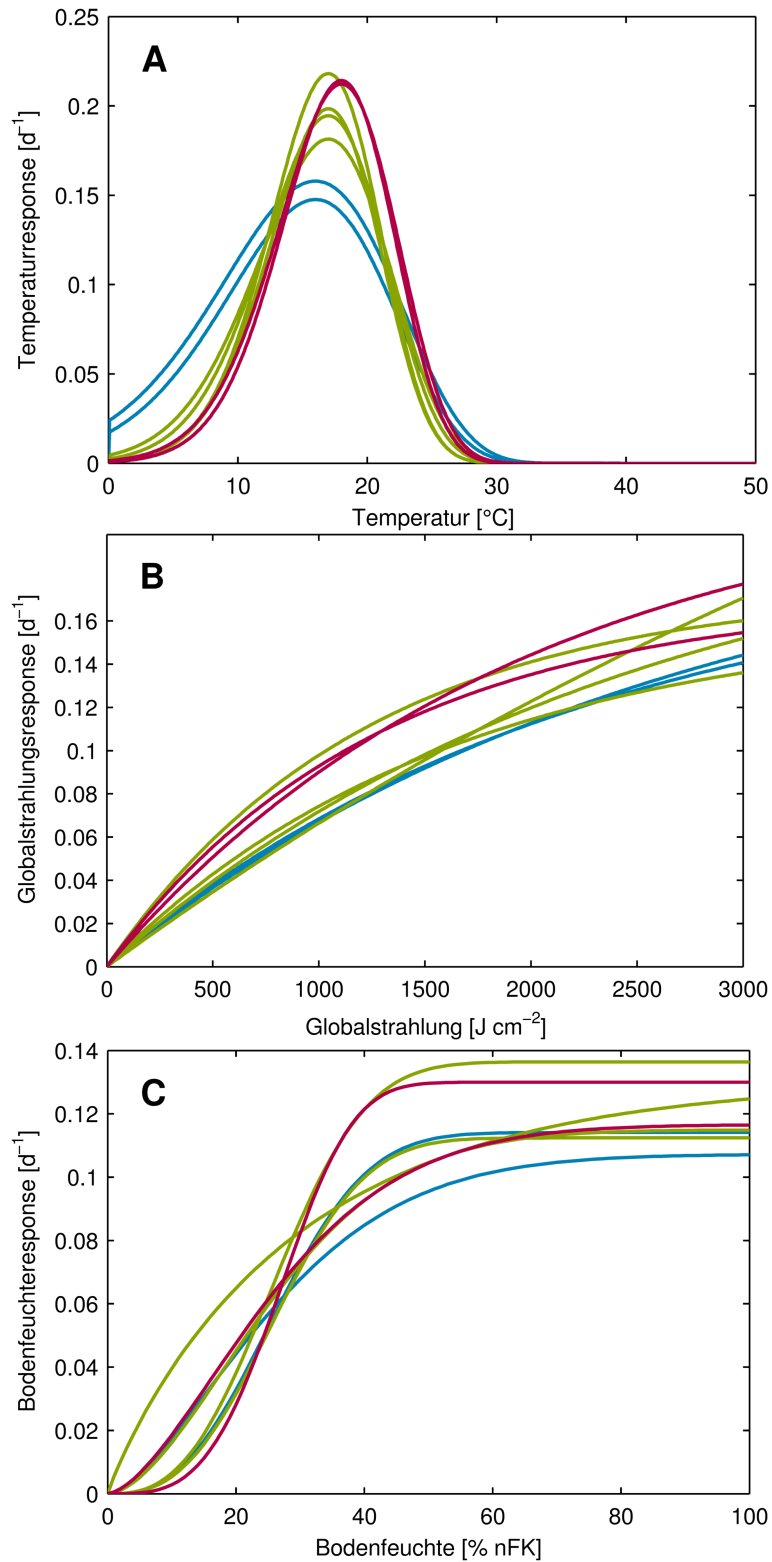


Abbildung 3.5.: Temperaturresponsen während des ersten Aufwuchses 2011 (A), Strahlungsresponsen während des ersten Aufwuchses 2012 (B) und Bodenfeuchteresponsen während des dritten Aufwuchses 2012 (C) der *L. perenne*-Sorten. Die Responsen der frühen Sorten sind in blau, die der mittleren Sorten in grün und die der späten Sorten in rot dargestellt.

Tabelle 3.8.: Konfidenzintervalle der sortenspezifisch geschätzten Wachstumsraten r_{\max} .

Sorte	H _{1a}	H _{1b}	H _{2a}	H _{2b}
Aba	0,20-0,23	0,09-0,09	0,17-0,19	0,11-0,13
Abs	0,13-0,16	0,07-0,08	0,13-0,17	0,10-0,12
Aub	0,17-0,19	0,08-0,09	0,15-0,17	0,10-0,12
Bar	0,19-0,21	0,07-0,08	0,13-0,15	0,12-0,15
Fen	0,18-0,21	0,07-0,08	0,15-0,17	0,10-0,12
Lip	0,15-0,17	0,08-0,08	0,14-0,15	0,10-0,13
Res	0,21-0,23	0,08-0,08	0,17-0,19	0,12-0,14
Spo	0,20-0,22	0,08-0,09	0,15-0,17	0,12-0,14

Tabelle 3.9.: Tage zwischen üblichem Schnittzeitpunkt t_1 („Beginn des Ährenschiebens“) und modellbasiert optimalem Schnittzeitpunkt t_2 (Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrages) für jede Sorte und alle Standorte.

Standort	Versuch	$t_2 - t_1$ [d]							
		Aba	Abs	Aub	Bar	Fen	Lip	Res	Spo
As	H _{1a}	+11	+13	+13	+10	+10	+19	+10	+11
Br	H _{1a}	+5	+14	+7	+4	+11	+20	+10	+4
Ma	H _{1a}	-	-	-	-	-	-	-	-
St	H _{1a}	+17	+26	+19	+19	+19	+34	+19	+17
As	H _{2a}	+5	+14	+9	+5	+9	+14	+9	+0
Br	H _{2a}	+6	+20	+12	+10	+16	+20	+9	+7
Ma	H _{2a}	+8	+19	+15	+9	+14	+15	+14	+5
St	H _{2a}	+9	+20	+19	+14	+19	+22	+19	+5

3.3.4. Modellbasiert optimaler Schnittzeitpunkt

Der modellbasiert optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion, der Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrages, wurde im ersten Schnitt beider Erntejahre von jeder Sorte später erreicht als der für die Futterproduktion übliche Schnittzeitpunkt, der Zeitpunkt „Beginn des Ährenschiebens“ (Tabelle 3.9). Die Differenz zwischen beiden Schnittzeitpunkten betrug im Mittel 13 Tage. Gemittelt über alle Orte und beide Jahre lag der modellbasiert optimale Schnittzeitpunkt für die frühen Sorten Lipresso und Abersilo 20 bzw. 18 Tage später als der übliche Schnittzeitpunkt, während für die späten Sorten Abervon und Sponsor nur 9 bzw. 7 Tage zwischen beiden Schnittzeitpunkten lagen. Die Sorten der mittleren Erntegruppe erreichten den modellbasiert optimalen Schnittzeitpunkt 10 bis 14 Tage nach dem Stadium „Beginn des Ährenschiebens“. Über beide Erntejahre unterschieden sich die Sorten in ihrem modellbasiert optimalen Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion um 10 Tage, während sie sich in ihrem für die Futterproduktion üblichen Schnittzeitpunkt um 23 Tage unterschieden.

Tabelle 3.10.: Anteil des modellierten verdaulichen Ertrages Y zum modellbasiert optimalen Schnittzeitpunkt t_2 am modellierten verdaulichen Ertrag zum üblichen Schnittzeitpunkt t_1 .

Standort	Versuch	Y_{t_2}/Y_{t_1} [%]							
		Aba	Abs	Aub	Bar	Fen	Lip	Res	Spo
As	H _{1a}	108	112	120	109	112	131	118	106
Br	H _{1a}	103	127	105	104	116	162	126	101
Ma	H _{1a}	-	-	-	-	-	-	-	-
St	H _{1a}	146	268	148	163	151	279	194	160
As	H _{2a}	112	141	117	112	118	135	127	100
Br	H _{2a}	117	169	142	125	152	157	121	118
Ma	H _{2a}	119	154	133	119	137	127	142	107
St	H _{2a}	115	247	165	135	153	166	173	103

Der modellierte verdauliche Ertrag zum modellbasiert optimalen Schnittzeitpunkt im ersten Schnitt der Erntejahre H₁ und H₂ betrug im Mittel 138% des modellierten verdaulichen Ertrages zum üblichen Schnittzeitpunkt (Tabelle 3.10). Gemittelt über alle Standorte und beide Erntejahre wurde die größte Zunahme des verdaulichen Ertrages für die frühen Sorten Abersilo und Lipresso beobachtet, während für die späten Sorten Sponsor und Aberavon die Zunahme des verdaulichen Ertrages am geringsten war.

3.4. Diskussion

Das entwickelte Ertrags- und Qualitätsmodell konnte gut an die experimentellen Daten aller Sorten und Standorte angepasst werden. Allerdings wurden die maximalen verdaulichen Erträge generell vom Modell unterschätzt, da der Modellparameter y_{\max} für den maximalen TM-Ertrag zum Zeitpunkt der maximalen Messung systematisch nicht erreicht wurde.

Im Folgenden sollen drei Hauptaspekte näher betrachtet werden: die ausgewählten Umweltprozesse, mögliche Ursachen für die Unterschiede zwischen den geschätzten Modellparametern für die untersuchten Sorten und die durchgeführten Versuche sowie den optimalen Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion aus *L. perenne*-Sorten.

3.4.1. Ausgewählte Umweltprozesse

Die AIC-basierte Auswahl eines Ertragsmodells mit einer integrierten Temperatur- und Bodenfeuchteresponse bzw. einer Temperatur- und Globalstrahlungsresponse für den ersten Schnitt zeigt, dass die sortenspezifische Ertragsentwicklung während des ersten Aufwuchses durch alle drei Prozesse erklärt werden kann. Dieses Ergebnis stimmt mit anderen Graswachstumsmodellen überein, die sowohl die Temperatur als auch die Sonneneinstrahlung und Wasserversorgung berücksichtigen (BARRETT et al., 2005; JOUVEN et al., 2006; KORNHER et al., 1991; MOORE et al., 1997; SCHAPENDONK et al., 1998). Die Ähnlichkeit der AIC-Werte für die Ertragsmodelle mit verschiedenen integrierten Umweltprozessen zeigt außerdem, dass alle drei Prozesse gegeneinander austauschbare Umweltprozesse sind, die notwendig sind, um die Ertragsentwicklung zu erklären. Die Auswahl verschiedener Umweltprozesse für den ersten Schnitt kann mit den unterschiedlichen Wetterbedingungen in den Erntejahren 2011 und 2012 erklärt werden (siehe Abbildung 3.1): Während der ersten Ernteperiode im Jahr 2011 waren die Temperaturen allgemein niedriger als während der ersten Ernteperiode 2012. Insbesondere zu Beginn waren die Temperaturen niedrig, zeitweise unter 5°C. Später lagen die Temperaturen immer über 10°C, während 2012 während des gesamten Aufwuchses Temperaturen unter 10°C auftraten. Zu Beginn der ersten Ernteperiode 2011, als die Temperaturen niedrig waren, zeigten die frühen Sorten ein stärkeres Wachstum als die späteren Sorten. Daher konnte dieser Wachstumsunterschied zwischen den Sorten von der Temperaturresponse wiedergegeben werden. Während der ersten Ernteperiode 2012 konnte ein eingeschränktes Wachstum auf Grund niedriger Temperaturen ebenfalls durch die Temperaturresponse wiedergegeben werden. In der ersten Ernteperiode 2011 wurden durchgängig niedrige Globalstrahlungswerte gemessen, während in der ersten Ernteperiode 2012 niedrige Strahlungswerte häufiger zu Beginn auftraten. Deshalb wurde im ersten Aufwuchs 2012 die sortenspezifische Ertragsentwicklung zusätzlich durch die Globalstrahlungsresponse wiedergegeben. Zu Beginn der ersten Ernteperiode 2011, als die Wurzellänge der Pflanzen noch gering war, war die Bodenfeuchte niedrig, im Gegensatz zur ersten Ernteperiode 2012. So wurde nur im ersten Aufwuchs 2011 die sortenspezifische Ertragsentwicklung zusätzlich durch die Bodenfeuchteresponse wiedergegeben. Die Nash-Sutcliffe-Koeffizienten E für das Ertragsmodell mit einer Temperatur- und Bodenfeuchteresponse bzw. einer Temperatur- und Globalstrahlungsresponse, gemittelt über alle Sorten und Standorte, unterschieden sich kaum voneinander: Für das Ertragsmodell mit einer Temperatur- und Bodenfeuchteresponse für den ersten Aufwuchs 2011 betrug E 0,95, während für das Er-

tragsmodell mit einer Temperatur- und Globalstrahlungsresponse E 0,94 betrug. Für das Modell mit einer Temperatur- und Bodenfeuchteresponse für den ersten Aufwuchs 2012 betrug E 0,92, während E für das Modell mit einer Temperatur- und Globalstrahlungsresponse 0,95 betrug. Daraus folgt, dass die Ertragsentwicklung im ersten Aufwuchs durch alle drei Umweltprozesse erklärt werden kann, was für ein Modell spricht, das alle drei Umweltresponsen beinhaltet. Die geschätzten sortenspezifischen Parameter des Ertragsmodells mit allen drei Umweltprozessen unterschieden sich ebenfalls zwischen den Sorten, hatten aber höhere Standardabweichungen.

Neben dem Akaike-Informationskriterium und dem Nash-Sutcliffe-Koeffizienten könnte auch die relative Standardabweichung der geschätzten Modellparameter ein Kriterium für die Modellauswahl sein. Für den ersten Schnitt 2011 betrug die relative Standardabweichung des Bodenfeuchteparameters γ , gemittelt über alle Sorten, 45,01%, während die mittlere relative Standardabweichung des Globalstrahlungsparameters β 53,85% betrug. Für den ersten Schnitt 2012 betrug die mittlere relative Standardabweichung von γ 198,04%, während die von β 44,44% betrug. Demnach kann es also auch im Hinblick auf die Unsicherheit der Parameterschätzung ratsam sein, neben einer Temperaturresponse für den ersten Aufwuchs 2011 eine Bodenfeuchteresponse und für den ersten Aufwuchs 2012 eine Globalstrahlungsresponse auszuwählen.

Für die sortenspezifische Ertragsentwicklung während des dritten Aufwuchses im ersten Erntejahr war keiner der drei Umweltprozesse entscheidend, während für den dritten Aufwuchs des zweiten Erntejahres das Modell mit einer integrierten Bodenfeuchteresponse selektiert wurde. Dies kann ebenfalls mit den Wetterbedingungen erklärt werden: Im Gegensatz zu 2011 war 2012 die Bodenfeuchte während der zweiten Ernteperiode an allen Standorten sehr gering. So konnte hier die Ertragsentwicklung der *L. perenne*-Sorten von der Bodenfeuchteresponse wiedergegeben werden. Die Temperatur und die Strahlung waren im Sommer allgemein höher als im Frühjahr und wiesen weniger Schwankungen auf (siehe Abbildung 3.1). Daher wurde das Graswachstum weder von der Temperatur noch von der Strahlung limitiert.

Hohe Standardabweichungen der sortenspezifischen Parameter des Modells mit allen drei Umweltprozessen können entweder durch die Unbestimmbarkeit der Parameter oder durch die Ununterscheidbarkeit der Sorten hervorgerufen worden sein. Jedoch hatte die Sorte neben dem Schnittzeitpunkt, Aufwuchs, Jahr und Standort einen signifikanten Einfluss auf Ertrag und Qualität (siehe Tabelle 3.5).

Trotz der allgemein höheren Standardabweichungen der sortenspezifischen Parameter konnte das Modell mit allen drei Umweltresponsen für den ersten Aufwuchs sortenspezifisch parametrisiert werden, ohne die dominantesten Prozesse zu selektieren. Als einzige Ausnahme konnte der Bodenfeuchteparameter γ für den ersten Aufwuchs des zweiten Erntejahres nicht geschätzt werden, möglicherweise, da die Bodenfeuchtedaten u.a. anhand von Referenzpflanzenparametern berechnet wurden und nicht den spezifischen transienten Wasserbedarf der untersuchten *L. perenne*-Sorten berücksichtigten. Für den dritten Aufwuchs konnte das Modell mit allen drei Umweltprozessen nicht sortenspezifisch parametrisiert werden. Eine mögliche Ursache könnten ungenaue Parameter für die maximale bzw. kritische Temperatur, Globalstrahlung oder Bodenfeuchte sein. Ein anderer Grund könnte eine unzureichende Datendichte sein, um akzeptable Standardabweichungen der sortenspezifischen Modellparameter zu erreichen, da die Umweltbedingungen im Sommer weniger variieren als im Frühjahr. Demzufolge sollten für die Modellparametrisierung des dritten Aufwuchses mehr Messungen durchgeführt werden. Für eine sortenspezifische Parametrisierung umfangreicherer Modelle, die eine größere Anzahl Parameter beinhalten, wie die bereits existierenden Modelle, wären demnach noch größere Datensätze erforderlich.

3.4.2. Ursachen für die Unterschiede zwischen den geschätzten Modellparametern für die untersuchten Sorten und die durchgeführten Versuche

Im ersten Aufwuchs beider Erntejahre wurde die Reifezeit der frühen Sorten durch niedrigere Wachstumsraten, besonders im ersten Erntejahr, kleinere Temperaturkoeffizienten und, als Resultat daraus, eine geringere Wachstumshemmung bei niedrigen Temperaturen und eine stärkere Wachstumshemmung bei höheren Temperaturen wiedergegeben. Zu Beginn des ersten Aufwuchses 2011 zeigten die frühen Sorten ein stärkeres Wachstum als die späteren Sorten, während die frühen Sorten am Ende der Ernteperiode im Vergleich zu den späteren Sorten langsamer wuchsen. Infolgedessen unterschieden sich die Wachstumsraten und Temperaturkoeffizienten der frühen Sorten von denen der späteren Sorten. Im ersten Aufwuchs 2012 wurde die Ertragsentwicklung der frühen Sorten weniger durch Perioden niedriger Temperaturen eingeschränkt als die Ertragsentwicklung der späteren Sorten. Daher zeigten die frühen Sorten höhere Temperaturresponsen für niedrige Temperaturen als die späteren Sorten. Im ersten Aufwuchs des ersten Erntejahres

und im dritten Aufwuchs des zweiten Erntejahres, als die Bodenfeuchte zeitweise an allen Standorten niedrig war, zeigten die Sorten unterschiedliche Bodenfeuchteresponsen. Dies weist darauf hin, dass sich die Sorten hinsichtlich ihrer Trockentoleranz unterscheiden. Untersuchungen der Auswirkungen von Trockenstress auf das Wurzelwachstum verschiedener *L. perenne*-Genotypen (CRUSH et al., 2007; FOITO et al., 2009) bestätigen dieses Ergebnis.

3.4.3. Der optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion

Der angenommene optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion, der Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrages, konnte mit Hilfe des berechneten flächenspezifischen Methanertrages verifiziert werden. Die Ergebnisse aus Versuchen mit der kontinuierlichen Fermentation von Silagen der Sorten Aberavon und Fennema, die an unterschiedlichen Terminen der ersten Ernteperiode 2012 hergestellt wurden, bestätigen ebenfalls einen späten optimalen Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion (SONNLEITNER, 2013). Hier wurden mit den Silagen, die an den späten Ernteterminen hergestellt wurden, die höchsten Biogasausbeuten erreicht. Der Grund dafür sind wahrscheinlich niedrige Stickstoffkonzentrationen im Biogasfermenter und die daraus resultierende geringe Hemmung des Fermentationsprozesses durch Stickstoff. Somit hat sich der maximal verdauliche Ertrag als ein geeigneter Indikator für den optimalen Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion aus Gras erwiesen.

Der erhöhte verdauliche Ertrag zum modellbasiert optimalen Schnittzeitpunkt konnte durch eine längere Biomasseproduktion erreicht werden, während der die Zunahme des TM-Ertrages die Abnahme der Qualität bzw. die Zunahme der Rohfaser übertraf. Dieses Ergebnis stimmt mit den Ergebnissen früherer Arbeiten überein, in denen mit einem späteren ersten Schnitt höhere flächenspezifische Methanerträge erzielt wurden (AMON et al., 2007; MCENIRY und O'KIELY, 2013). Allerdings wurde für einige Sorten der optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion gegen Ende des Versuchszeitraums ermittelt, weshalb zur Verifikation der bestimmten optimalen Schnittzeitpunkte weitere Versuche durchgeführt werden sollten, die einen längeren Zeitraum umfassen. Mit Hilfe des vorgestellten Ertrags- und Qualitätsmodells können der verdauliche Ertrag und der optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion noch genauer vorhergesagt werden.

3.5. Schlussfolgerungen

Das vorgestellte Modell ist geeignet, *L. perenne*-Sorten auf der Basis von Ertrag, Qualität und Umweltresponse zu charakterisieren. Die sortenspezifischen Modellparameter spiegeln Unterschiede in der Reifezeit und Trockentoleranz wider. Der verdauliche Ertrag zum modellbasiert optimalen Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion war im Vergleich zum üblichen Schnittzeitpunkt für die Futterproduktion erhöht.

In Abhängigkeit von den Wetterbedingungen erwiesen sich unterschiedliche Umweltprozesse als dominant für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung. Dennoch konnte für den ersten Aufwuchs das Modell mit einer Temperatur-, Globalstrahlungs- und Bodenfeuchteresponse sortenspezifisch parametrisiert werden. Zur Parametrisierung dieses Modells für den dritten Aufwuchs sind sehr engmaschige Datenerhebungen erforderlich. Somit können in einer laufenden Vegetationsperiode mit bekanntem Wachstumsbeginn und der Einbeziehung von Wettervorhersagedaten mit Hilfe des Modells der verdauliche Ertrag und der optimale Schnittzeitpunkt für einen erhöhten Biogasertrag sortenspezifisch vorhergesagt werden.

Kapitel 4.

Parameterverifikation und Modellunsicherheit

4.1. Einleitung

Anhand zweier Versuchsjahre wurden Prozesse und Parameter identifiziert, mit denen die sortenspezifische Entwicklung des verdaulichen Ertrages von *Lolium perenne*-Sorten im ersten und zweiten Hauptnutzungsjahr wiedergegeben werden konnte. Die Durchführung der Feldversuche an verschiedenen Standorten ermöglichte Versuchswiederholungen mit unterschiedlichen Wetterbedingungen. So konnte der Einfluss der Umweltbedingungen auf die Ertrags- und Qualitätsentwicklung von *L. perenne*-Sorten gut untersucht werden. Zum Beispiel spiegelten sich die Wetterbedingungen des Bergstandortes Steinaach mit im Vergleich zu den Tieflandstandorten niedrigeren Frühjahrstemperaturen in einem verzögerten aber stärkeren Biomassewachstum der Sorten wider. Um also möglichst unterschiedliche Wetterbedingungen berücksichtigen zu können ist die Auswahl von Standorten in unterschiedlichen geografischen Lagen vorteilhaft.

Im folgenden Kapitel soll das für das erste Hauptnutzungsjahr entwickelte Wachstumsmodell mit den integrierten Umweltprozessen und geschätzten Parametern mit den Daten einer Versuchswiederholung validiert werden. Dazu sollen zunächst die anhand des ersten Versuchsjahres geschätzten sortenspezifischen Modellparameter verifiziert und die Modellunsicherheit überprüft werden.

Beim Begriff der Modellunsicherheit kann zwischen aleatorischer (zufälliger) und epistemologischer (erkenntnistheoretischer) Modellunsicherheit unterschieden werden (BEVEN und YOUNG, 2013). Während aleatorische Modellunsicherheiten, wie z.B. Messungenauigkeiten, durch anscheinend zufällige Variabilität entstehen, sind epistemologische Modellunsicherheiten, wie z.B. die Wahl der Funktionen in einer Modellgleichung, auf Unwissenheit und Unverständnis zurückzuführen. Andere Autoren unterscheiden zwischen Unsicherheiten der Modellinputs und Unsicherheiten der Modelle, welche wiederum in strukturelle Unsicherheiten, Parameterunsicherheiten und Lösungsunsicherheiten unterteilt werden können (BROWN und HEUVELINK, 2005). In dieser Arbeit wird der Begriff der Modellunsicherheit für die Unsicherheit bei der Parameterschätzung verwendet. Zur Beurteilung der Modellunsicherheit wird die Standardabweichung der geschätzten Parameter herangezogen.

Des Weiteren sollen für den Validationsdatensatz, unabhängig vom ersten Versuchsjahr, die Umweltprozesse und sortenspezifischen Parameter identifiziert werden, die die Entwicklung des verdaulichen Ertrages der untersuchten Sorten am effizientesten erklären. Dabei soll auch beantwortet werden, ob sich der besonders für den ersten Schnitt des ersten Versuchsjahres gefundene Zusammenhang zwischen der Reifezeit der Sorten und den sortenspezifischen Wachstumsraten und Temperaturkoeffizienten bestätigt. Schließlich soll der Effekt des Poolens der Datensätze beider Jahre hinsichtlich der Modellunsicherheit, der Modellparameter und der dominanten Umweltprozesse untersucht werden.

4.2. Material und Methoden

Die Daten der Versuchswiederholung wurden zum Einen benutzt, um die für das erste Hauptnutzungsjahr geschätzten sortenspezifischen Modellparameter zu verifizieren. Zum Anderen wurden sie auch dafür verwendet, um unabhängig vom ersten Versuchsjahr und anhand eines gepoolten Datensatzes beider Versuchsjahre die dominanten Umweltprozesse und sortenspezifische Parameter zu identifizieren.

Die Modellvalidierung und -optimierung für den dritten Schnitt wurde von SCHOMANN (2015) durchgeführt.

4.2.1. Versuch

Um die geschätzten Modellparameter zu verifizieren und die Modellunsicherheit zu untersuchen, wurde das erste Hauptnutzungsjahr H_1 des in 3.2.3 beschriebenen Feldversuchs in einem dritten Erntejahr H_3 an allen Standorten wiederholt. An jedem Termin der Zeitreihenernten zum ersten (a) und dritten Schnitt (b) wurden neben dem Entwicklungsstadium jeder Sorte, dieselben Ertrags-, Qualitäts- und Wetterdaten (Abbildung 4.1) erfasst. Auf Grund starker Trockenheit konnte allerdings am Standort Malchow kein dritter Schnitt durchgeführt werden.

4.2.2. Modellvalidierung

Die Modellvalidierung für den ersten Aufwuchs des ersten Hauptnutzungsjahres H_{1a} wurde mit dem Modell mit allen drei Umweltprozessen - einer Temperaturresponse, einer Globalstrahlungsresponse und einer Bodenfeuchteresponse - und den für H_{1a} geschätzten sortenspezifischen Parametern r_{\max} , Q_{10} , γ , β und θ_F durchgeführt. Zusätzlich wurde die Modellvalidierung mit dem für H_{1a} selektierten Modell mit einer Temperatur- und Bodenfeuchteresponse und den für H_{1a} geschätzten sortenspezifischen Parametern r_{\max} , Q_{10} , γ und θ_F durchgeführt. Die Modellvalidierung für den dritten Aufwuchs des ersten Hauptnutzungsjahres H_{1b} erfolgte mit dem für H_{1b} selektierten Modell ohne Umweltresponse und den für H_{1b} geschätzten sortenspezifischen Parametern r_{\max} und θ_F . Da im dritten Erntejahr am Standort Malchow wegen starker Trockenheit kein dritter Schnitt durchgeführt werden konnte, konnte das Modell für H_{1b} nur anhand der Daten der Standorte Asendorf, Braunschweig und Steinach validiert werden. Im ersten Schritt wurden die Modelle auf die Versuchswiederholung H_3 angewendet, wobei die Anfangsbedingung y_0 und das Ertragsmaximum y_{\max} des Validationsdatensatzes verwendet wurden. Für jede Sorte wurde die Modellgüte anhand des Nash-Sutcliffe-Koeffizienten E (NASH und SUTCLIFFE, 1970) beurteilt. Im zweiten Schritt wurden für H_{1a} und H_{1b} jeweils 100 Simulationen mit Zufallswerten für die sortenspezifischen Modellparameter durchgeführt, wobei angenommen wurde, dass diese normalverteilt und voneinander unabhängig waren. Anschließend wurden anhand der Standardabweichung der 100 Simulationen Vorhersageintervalle berechnet, und es wurde untersucht, ob die Daten der Versuchswiederholung H_3 innerhalb der Vorhersageintervalle für das erste Versuchsjahr H_1 lagen.

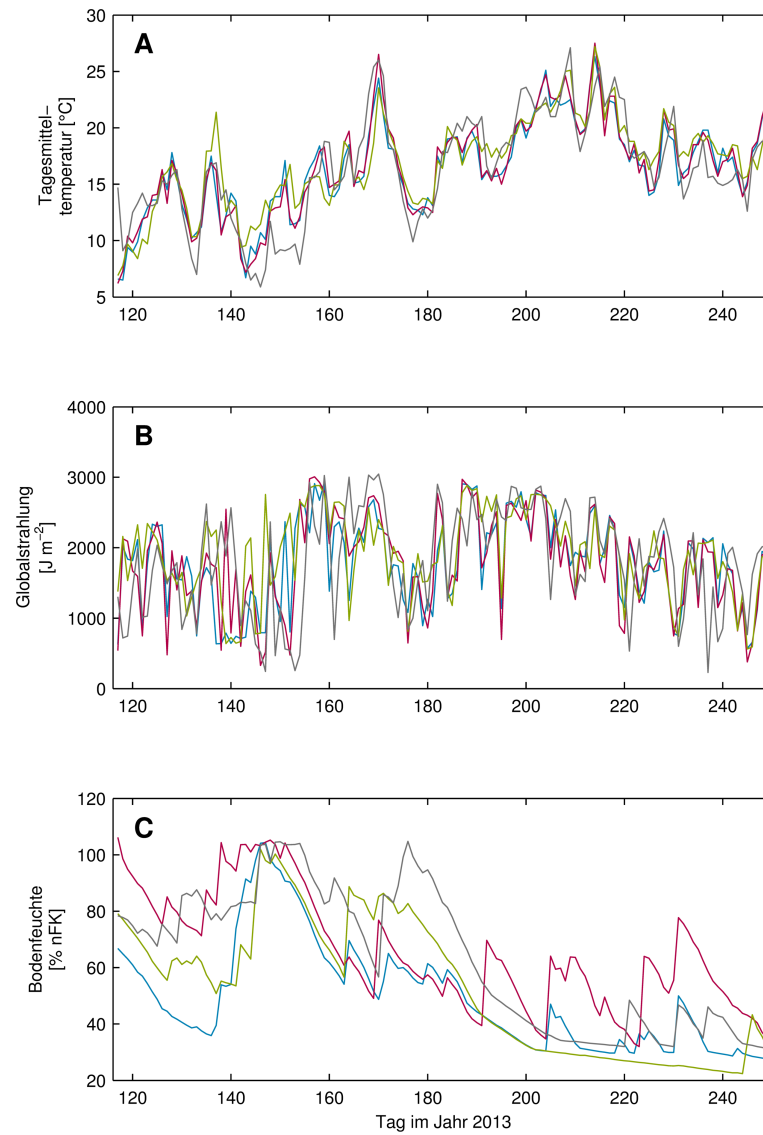


Abbildung 4.1.: Umweltbedingungen Tagesmitteltemperatur, Globalstrahlung und Bodenfeuchte des Versuchsjahres 2013 an den Standorten Asendorf (blau), Braunschweig (rot), Malchow (grün) und Steinach (grau).

4.2.3. Unabhängige Prozess- und Parameteridentifikation

Unabhängig vom ersten Versuchsjahr H_1 wurden für die Versuchswiederholung H_3 mit Hilfe des Akaike Informationskriteriums (AIC) (AKAIKE, 1978) die Umweltprozesse identifiziert, die notwendig waren, um die sortenspezifische Ertragsentwicklung im ersten und dritten Aufwuchs zu erklären. Dazu wurden für jede Kombination der Umweltprozesse Temperatur, Globalstrahlung und Bodenfeuchte AIC-Werte berechnet. Die Kombination, die den niedrigsten AIC-Wert ergab, wurde in das Ertragsmodell integriert. Dabei wurden für den ersten und dritten Aufwuchs der Versuchswiederholung die sortenspezifischen Modellparameter unabhängig vom ersten Versuchsjahr mit Hilfe eines lokalen Optimierungsalgorithmus von Matlab 2011b (Mathworks®, Natick, Massachusetts) und der experimentellen Ertrags- und Rohfaserdaten geschätzt. Anschließend wurde untersucht, ob die für H_1 und H_3 geschätzten Parameter innerhalb ihrer Standardabweichung lagen und ob sich auch für H_{3a} ein Zusammenhang zwischen den sortenspezifischen Parametern und der Reifezeit der *L. perenne*-Sorten zeigte.

4.2.4. Gepoolte Prozess- und Parameteridentifikation

Zur Modelloptimierung wurden die Daten des ersten und dritten Aufwuchses des ersten Versuchsjahres H_1 und der Versuchswiederholung H_3 gepoolt. Für diese gepoolten Datensätze wurden die sortenspezifischen Modellparameter neu angepasst, und es wurde untersucht, ob durch das Poolen der Datensätze eine Reduzierung der Standardabweichung erreicht werden konnte, sowie ob die sortenspezifischen Parameter auch hier einen Zusammenhang mit der Reifezeit der *L. perenne*-Sorten aufwiesen. Des Weiteren wurden für die gepoolten Datensätze anhand des AIC die zur Erklärung der sortenspezifischen Ertragsentwicklung notwendigen Umweltprozesse identifiziert.

4.3. Ergebnisse

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Modellvalidierung für den ersten und dritten Aufwuchs des ersten Hauptnutzungsjahres anhand der Versuchswiederholung präsentiert. Anschließend werden die für die Versuchswiederholung unabhängig vom ers-

ten Versuchsjahr identifizierten Prozesse und Parameter vorgestellt. Dabei wird auch betrachtet, ob die für das erste Versuchsjahr und die Versuchswiederholung geschätzten sortenspezifischen Parameter innerhalb ihrer Standardabweichung lagen, und ob die für die Versuchswiederholung geschätzten Parameter Sortenunterschiede zeigten. Schließlich wird auf die anhand gepoolter Daten beider Versuchsjahre identifizierten Prozesse und Parameter eingegangen, auch im Hinblick auf die Modellunsicherheit und den Zusammenhang zwischen den sortenspezifisch geschätzten Parametern und der Sortenreifezeit.

4.3.1. Modellvalidierung

Das Modell mit allen drei Umweltprozessen und den für den ersten Aufwuchs des ersten Versuchsjahres H_{1a} geschätzten sortenspezifischen Parametern konnte gut an die Daten der Versuchswiederholung H_{3a} angepasst werden. Der Nash-Sutcliffe-Koeffizient E , berechnet für jede Sorte und über alle Standorte, war $\geq 0,95$. Die für jede Sorte und jeden Standort berechneten Nash-Sutcliffe-Koeffizienten betrugen im Mittel 0,90. Das für H_{1a} selektierte Modell mit einer Temperatur- und Bodenfeuchteresponse konnte ebenfalls gut an die Daten der Versuchswiederholung angepasst werden. Der Nash-Sutcliffe-Koeffizient, berechnet für jede Sorte und über alle Standorte, war hier $\geq 0,96$. Die für jede Sorte und jeden Standort berechneten Nash-Sutcliffe-Koeffizienten betrugen im Mittel 0,89 (Tabelle 4.1). Das für den dritten Aufwuchs des ersten Versuchsjahres H_{1b} selektierte Modell ohne integrierte Umweltprozesse konnte weniger gut an die Daten der Versuchswiederholung angepasst werden als das Modell für den ersten Aufwuchs. Der Nash-Sutcliffe-Koeffizient, berechnet für jede Sorte und über alle Standorte, war hier zwar $\geq 0,98$, die für jede Sorte und jeden Standort berechneten Nash-Sutcliffe-Koeffizienten betrugen jedoch im Mittel nur 0,43. Auf Grund der großen Spannbreite bei der Berechnung der Nash-Sutcliffe-Koeffizienten über alle Standorte waren diese größer als die für jeden einzelnen Standort berechneten Nash-Sutcliffe-Koeffizienten.

Für den ersten Aufwuchs des ersten Hauptnutzungsjahres lagen insgesamt 48% aller Validationsdaten innerhalb der berechneten Vorhersageintervalle für den verdaulichen Ertrag (Abbildung 4.2 bis 4.9). Für den dritten Aufwuchs des ersten Hauptnutzungsjahres lagen nur 12% der Validationsdaten innerhalb der berechneten Vorhersageintervalle.

Tabelle 4.1.: Nash-Sutcliffe-Koeffizienten E für die angebauten Sorten an allen Standorten für das Ertragsmodell mit den für das erste Versuchsjahr angepassten sortenspezifischen Parametern und den Daten der Versuchswiederholung für den ersten und dritten Schnitt.

Standort	Schnitt	Aba	Abs	Aub	Bar	Fen	Lip	Res	Spo
As	1	0,90	0,69	0,93	0,91	0,92	0,94	0,89	0,92
Br	1	0,95	0,91	0,94	0,91	0,83	0,86	0,90	0,94
Ma	1	0,86	0,76	0,91	0,90	0,72	0,92	0,91	0,85
St	1	0,92	0,93	0,97	0,91	0,96	0,98	0,95	0,80
As	3	0,54	0,66	0,29	0,49	0,54	-0,15	0,24	0,25
Br	3	0,59	0,58	0,42	0,72	0,58	0,49	0,83	0,53
Ma	3	-	-	-	-	-	-	-	-
St	3	0,07	0,09	0,45	0,65	0,42	0,22	0,46	0,35

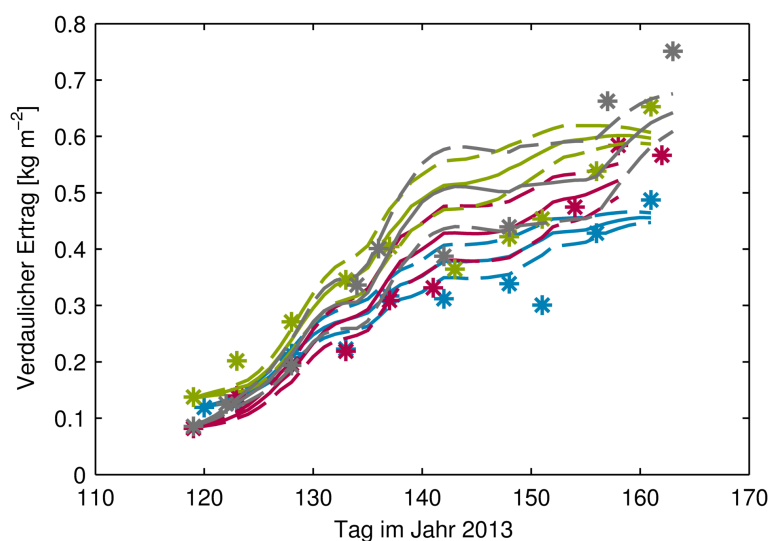


Abbildung 4.2.: Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall (Linien) für den verdaulichen Ertrag der Sorte Aberavon und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 (Symbole) an den Standorten Asendorf (blau), Braunschweig (rot), Malchow (grün) und Steinach (grau).

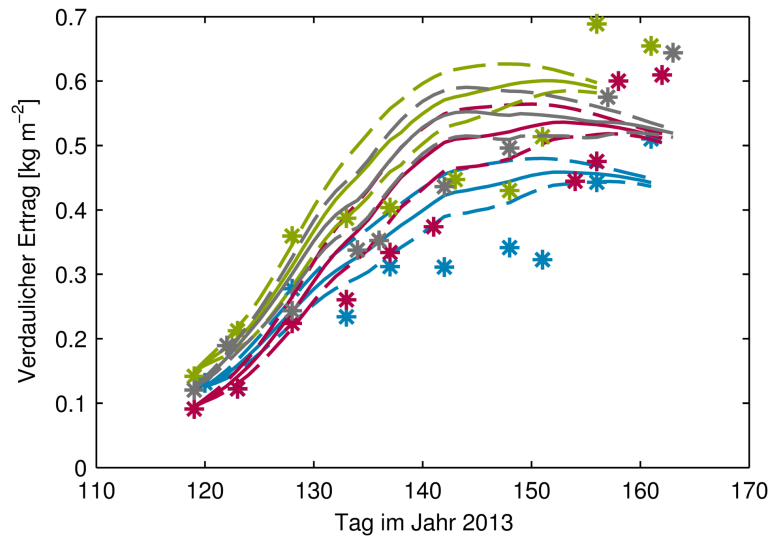


Abbildung 4.3.: Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall (Linien) für den verdaulichen Ertrag der Sorte Abersilo und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 (Symbole) an den Standorten Asendorf (blau), Braunschweig (rot), Malchow (grün) und Steinach (grau).

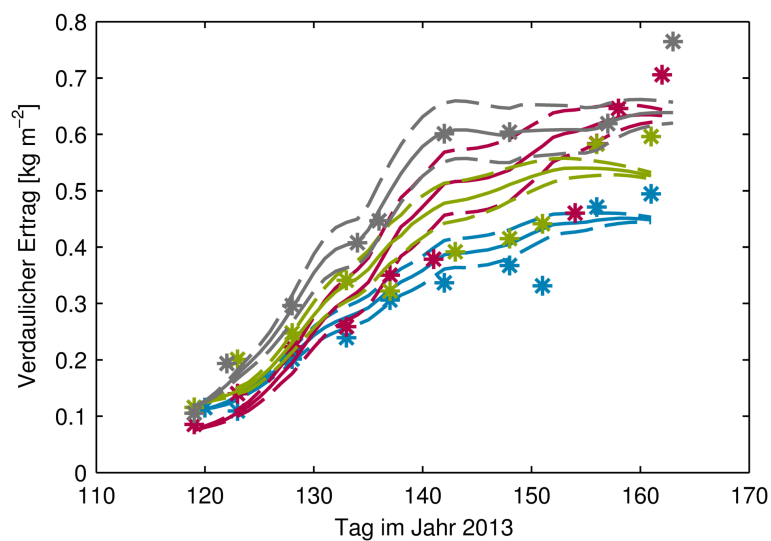


Abbildung 4.4.: Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall (Linien) für den verdaulichen Ertrag der Sorte Aubisque und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 (Symbole) an den Standorten Asendorf (blau), Braunschweig (rot), Malchow (grün) und Steinach (grau).

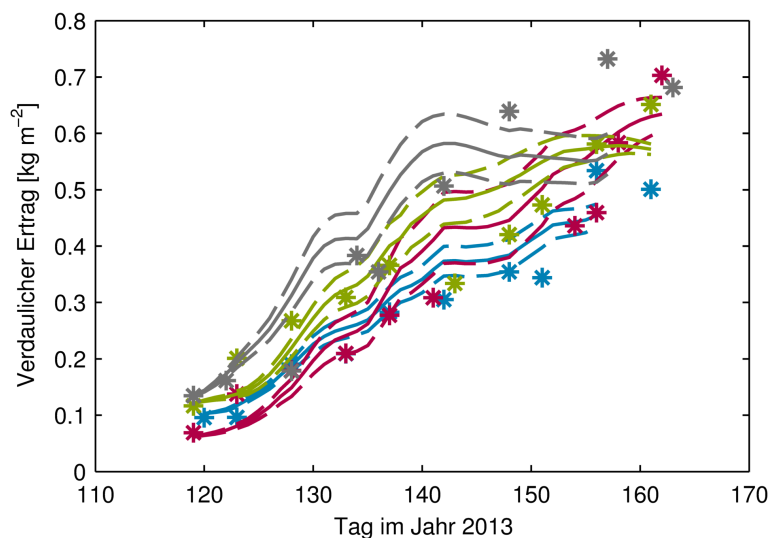


Abbildung 4.5.: Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall (Linien) für den verdaulichen Ertrag der Sorte Bargala und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 (Symbole) an den Standorten Asendorf (blau), Braunschweig (rot), Malchow (grün) und Steinach (grau).

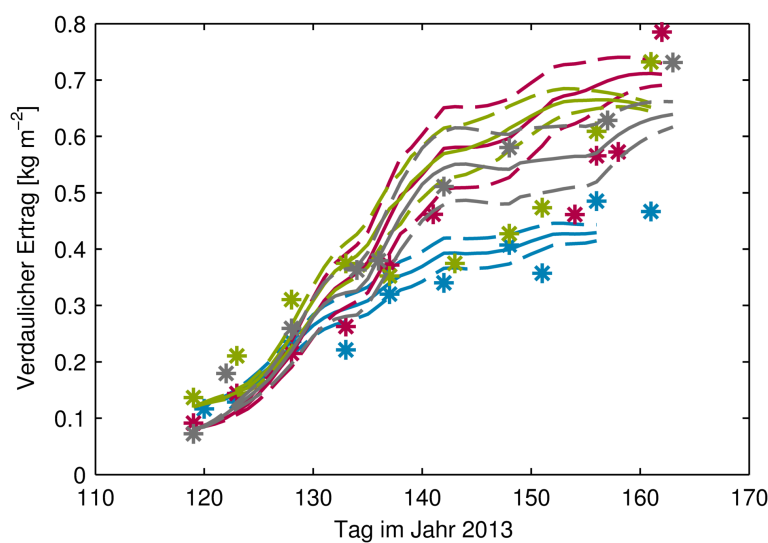


Abbildung 4.6.: Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall (Linien) für den verdaulichen Ertrag der Sorte Fennema und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 (Symbole) an den Standorten Asendorf (blau), Braunschweig (rot), Malchow (grün) und Steinach (grau).

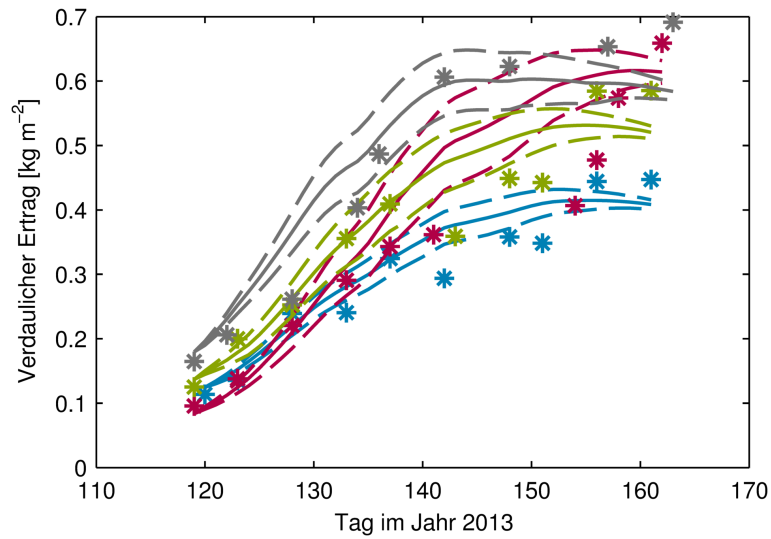


Abbildung 4.7.: Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall (Linien) für den verdaulichen Ertrag der Sorte Lipresso und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 (Symbole) an den Standorten Asendorf (blau), Braunschweig (rot), Malchow (grün) und Steinach (grau).

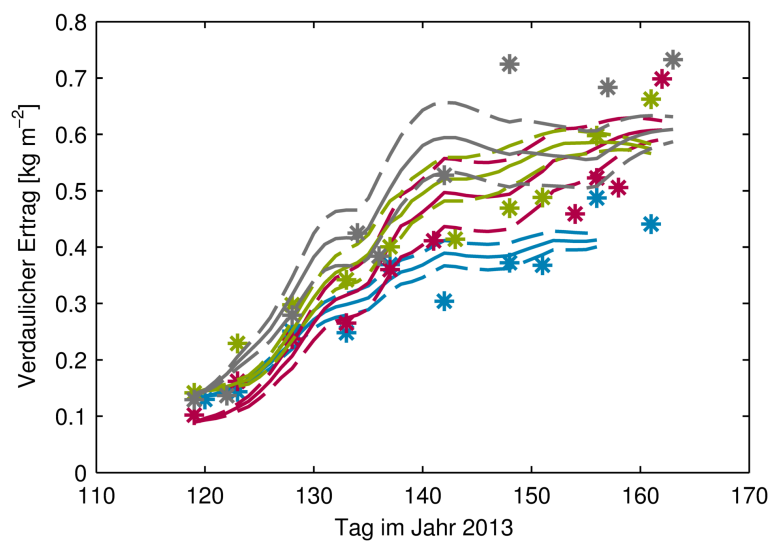


Abbildung 4.8.: Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall (Linien) für den verdaulichen Ertrag der Sorte Respect und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 (Symbole) an den Standorten Asendorf (blau), Braunschweig (rot), Malchow (grün) und Steinach (grau).

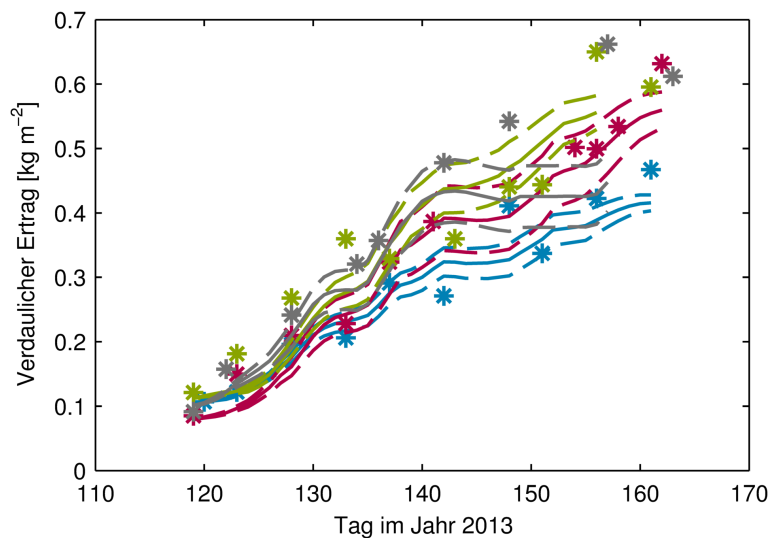


Abbildung 4.9.: Anhand der für den ersten Aufwuchs 2011 geschätzten Modellparameter berechnetes Vorhersageintervall (Linien) für den verdaulichen Ertrag der Sorte Sponsor und gemessene verdauliche Erträge des ersten Schnittes 2013 (Symbole) an den Standorten Asendorf (blau), Braunschweig (rot), Malchow (grün) und Steinach (grau).

4.3.2. Unabhängig identifizierte Prozesse und geschätzte Parameter

Für die Daten des ersten Aufwuchses der Versuchswiederholung wurde anhand der berechneten AIC-Werte das Ertragsmodell mit einer Strahlungs- und Bodenfeuchteresponse selektiert, während für den dritten Aufwuchs der Versuchswiederholung das Modell mit einer integrierten Temperaturresponse selektiert wurde (Tabelle 4.2). Der Nash-Sutcliffe-Koeffizient E , berechnet für jede Sorte und jeden Standort, betrug für den ersten Aufwuchs im Mittel 0,93 und für den dritten Aufwuchs 0,74.

Da im ersten Versuchsjahr H_1 und der Versuchswiederholung H_3 unterschiedliche Umweltprozesse zur Erklärung der sortenspezifischen Ertragsentwicklung im ersten und dritten Aufwuchs identifiziert wurden, wurde jeweils für beide selektierte Modelle untersucht, ob die für H_1 und H_3 geschätzten sortenspezifischen Parameter innerhalb ihrer Standardabweichung lagen.

Die mit dem Modell mit einer integrierten Strahlungs- und Bodenfeuchteresponse für den ersten Aufwuchs der Versuchswiederholung H_{3a} geschätzten Wachstumsraten lagen für die Sorten Aberavon, Abersilo und Lipresso innerhalb der Standardabweichung der für den ersten Aufwuchs des ersten Versuchsjahres H_{1a} geschätzten Wachstumsraten

Tabelle 4.2.: AIC-Werte für das Ertragsmodell ohne integrierte Umweltprozesse sowie mit den Umweltprozessen Temperatur ϕ_T , Bodenfeuchte ϕ_M und/oder Globalstrahlung ϕ_R und unabhängige Anpassung an die Ertragsdaten des ersten a und dritten Schnittes b der Versuchswiederholung H_3 .

Versuch	Umweltprozess	AIC-Wert
H_{3a}	-	-1656
H_{3a}	ϕ_T	-1624
H_{3a}	ϕ_M	-1659
H_{3a}	ϕ_R	-1657
H_{3a}	$\phi_T \times \phi_M$	-1641
H_{3a}	$\phi_T \times \phi_R$	-1643
H_{3a}	$\phi_M \times \phi_R$	-1663
H_{3a}	$\phi_T \times \phi_M \times \phi_R$	-1649
H_{3b}	-	-1631
H_{3b}	ϕ_T	-1665
H_{3b}	ϕ_M	-1621
H_{3b}	ϕ_R	-1605
H_{3b}	$\phi_T \times \phi_M$	-1646
H_{3b}	$\phi_T \times \phi_R$	-1639
H_{3b}	$\phi_M \times \phi_R$	-1596
H_{3b}	$\phi_T \times \phi_M \times \phi_R$	-1615

(Tabelle 4.3). Umgekehrt lagen die für H_{1a} geschätzten Wachstumsraten für die Sorten Aberavon, Abersilo, Aubisque und Fennema innerhalb der Standardabweichung der für H_{3a} geschätzten Wachstumsraten. Für die Sorte Abersilo wurde für H_{3a} eine etwas größere Wachstumsrate angepasst als für H_{1a} , während für alle übrigen Sorten kleinere Wachstumsraten angepasst wurden. Der für H_{3a} geschätzte Parameter β der Globalstrahlungsresponse lag für die Sorten Aberavon, Fennema und Lipresso innerhalb der Standardabweichung der für H_{1a} geschätzten Parameter. Allerdings betrug die Standardabweichung der für H_{1a} geschätzten Parameter z.T. $>100\%$. Der für H_{1a} geschätzte Parameter β lag lediglich für die Sorte Fennema innerhalb der Standardabweichung des für H_{3a} geschätzten Parameters. Für H_{3a} wurden für die Sorten Aberavon, Abersilo und Lipresso kleinere Parameter für β angepasst als für H_{1a} , während für die übrigen Sorten größere angepasst wurden. Der für H_{3a} geschätzte Parameter γ der Bodenfeuchteresponse lag für die Sorten Abersilo, Aubisque und Fennema innerhalb der Standardabweichung der für H_{1a} geschätzten Parameter. Umgekehrt lag der für H_{1a} geschätzte Parameter γ für alle Sorten innerhalb der Standardabweichung der für H_{3a} geschätzten Parameter. Allerdings hatten die für beide Versuche angepassten Parameter sehr hohe Standardabweichungen von oft $>100\%$. Für H_{3a} wurden für alle Sorten größere Parameter für γ angepasst als für H_{1a} . Die für H_{3a} und H_{1a} geschätzten Rohfaserneubildungsraten lagen

für keine der angebauten Sorten innerhalb der Standardabweichungen, wobei die Standardabweichungen für beide Versuche sehr klein waren. Für alle Sorten wurden für H_{3a} größere Rohfaserneubildungsraten angepasst als für H_{1a} .

Die mit dem Modell mit einer integrierten Temperatur- und Bodenfeuchteresponse für H_{3a} geschätzten Wachstumsraten lagen für keine der untersuchten Sorten innerhalb der Standardabweichung der für H_{1a} geschätzten Wachstumsraten (Tabelle 4.4). Umgekehrt lagen die für H_{1a} geschätzten Wachstumsraten lediglich für die frühe Sorte Abersilo und die späte Sorte Sponsor innerhalb der Standardabweichung der für H_{3a} geschätzten Wachstumsraten. Für alle Sorten wurden für H_{3a} kleinere Wachstumsraten angepasst als für H_{1a} . Die für beide Versuche geschätzten Temperaturkoeffizienten der Temperaturresponse lagen lediglich für die beiden frühen Sorten Abersilo und Lipresso innerhalb ihrer Standardabweichung. Für diese Sorten wurden für H_{3a} etwas größere Temperaturkoeffizienten angepasst, während für die übrigen Sorten kleinere Koeffizienten angepasst wurden. Der für H_{3a} geschätzte Parameter γ lag für keine der angebauten Sorten innerhalb der Standardabweichung der für H_{1a} geschätzten Parameter. Umgekehrt lag der für H_{1a} geschätzte Parameter γ für fast alle Sorten innerhalb der Standardabweichung der für H_{3a} geschätzten Parameter, wobei die Standardabweichung von γ für H_{3a} sehr hoch war, z.T. $>100\%$. Für die Sorte Abersilo wurde für H_{3a} ein kleinerer Parameter angepasst, während für die übrigen Sorten größere angepasst wurden. Die für H_{3a} und H_{1a} geschätzten Rohfaserneubildungsraten lagen lediglich für die Sorte Aubisque innerhalb der Standardabweichungen, wobei, wie beim Modell mit einer Strahlungs- und Bodenfeuchteresponse, die Standardabweichungen für beide Versuche sehr klein waren. Für die Sorten Aberavon, Bargala, Fennema, Lipresso und Sponsor wurden für H_{3a} größere Rohfaserneubildungsraten angepasst als für H_{1a} , während für die Sorten Abersilo, Aubisque und Respect kleinere angepasst wurden.

Für den dritten Aufwuchs des ersten Versuchsjahres H_{1b} wurde das Modell ohne Umweltprozesse selektiert, während für den dritten Aufwuchs der Versuchswiederholung H_{3b} das Modell mit einer Temperaturresponse selektiert wurde.

Die mit dem Modell ohne Umweltprozesse für H_{3b} geschätzten Wachstumsraten lagen für keine der Sorten innerhalb der Standardabweichung der für H_{1b} geschätzten Wachstumsraten (Tabelle 4.5). Auch umgekehrt lagen die für H_{1b} geschätzten Wachstumsraten für keine der Sorten innerhalb der Standardabweichung der für H_{3b} geschätzten Wachstumsraten. Insgesamt hatten die Sorten in H_{1b} deutlich höhere Wachstumsraten als in

Tabelle 4.3.: Mit dem Modell mit integrierter Strahlungs- und Bodenfeuchteresponse für den ersten Schnitt des ersten Versuchsjahres H_{1a} und den ersten Schnitt der Versuchswiederholung H_{3a} geschätzte sortenspezifische Modellparameter Wachstumsrate r_{\max} , Parameter für die Strahlungsresponse β , Parameter für die Bodenfeuchteresponse γ und Rohfaserneubildungsrate θ_F .

Sorte	H_{1a} r_{\max} [d^{-1}]	H_{3a} r_{\max} [d^{-1}]	H_{1a} β [$J\ cm^{-2}$]	H_{3a} β [$J\ cm^{-2}$]	H_{1a} γ [% nFK^{-1}]	H_{3a} γ [% nFK^{-1}]	H_{1a} θ_F [d^{-1}]	H_{3a} θ_F [d^{-1}]
Abba	0,16 \pm 0,02	0,15 \pm 0,04	3,37 \pm 2,06	2,08 \pm 0,57	0,36 \pm 0,57	1,13 \pm 1,77	0,01 \pm 0,00	0,02 \pm 0,00
Abs	0,16 \pm 0,02	0,16 \pm 0,02	3,56 \pm 1,39	1,60 \pm 0,43	0,60 \pm 0,71	1,11 \pm 0,95	0,02 \pm 0,00	0,02 \pm 0,00
Aub	0,16 \pm 0,02	0,14 \pm 0,03	2,17 \pm 1,19	3,73 \pm 0,49	0,70 \pm 0,58	1,09 \pm 1,25	0,01 \pm 0,00	0,02 \pm 0,00
Bar	0,20 \pm 0,02	0,14 \pm 0,01	0,52 \pm 0,64	2,34 \pm 1,12	0,44 \pm 0,47	1,38 \pm 1,23	0,01 \pm 0,00	0,02 \pm 0,00
Fen	0,16 \pm 0,03	0,13 \pm 0,06	3,35 \pm 2,09	4,32 \pm 2,43	0,52 \pm 0,67	1,13 \pm 3,41	0,01 \pm 0,00	0,02 \pm 0,00
Lip	0,14 \pm 0,02	0,13 \pm 0,00	4,95 \pm 3,22	2,78 \pm 0,73	0,51 \pm 0,53	2,50 \pm 2,69	0,01 \pm 0,00	0,02 \pm 0,00
Res	0,21 \pm 0,03	0,13 \pm 0,01	0,54 \pm 0,67	2,81 \pm 0,77	0,49 \pm 0,50	1,88 \pm 1,50	0,01 \pm 0,00	0,02 \pm 0,00
Spo	0,20 \pm 0,02	0,15 \pm 0,04	0,50 \pm 0,56	2,63 \pm 0,94	0,07 \pm 0,39	1,08 \pm 1,86	0,01 \pm 0,00	0,02 \pm 0,00

Tabelle 4.4.: Mit dem Modell mit integrierter Temperatur- und Bodenfeuchteresponse für den ersten Schnitt des ersten Versuchsjahres H_{1a} und den ersten Schnitt der Versuchswiederholung H_{3a} geschätzte sortenspezifische Modellparameter Wachstumsrate r_{\max} , Temperaturkoeffizient Q_{10} , Parameter für die Bodenfeuchteresponse γ und Rohfaserneubildungsrate θ_F .

Sorte	H_{1a} r_{\max} [d^{-1}]	H_{3a} r_{\max} [d^{-1}]	H_{1a} Q_{10} [$^{\circ}C^{-1}$]	H_{3a} Q_{10} [$^{\circ}C^{-1}$]	H_{1a} γ [% nFK^{-1}]	H_{3a} γ [% nFK^{-1}]	H_{1a} θ_F [d^{-1}]	H_{3a} θ_F [d^{-1}]
Aba	0,21 \pm 0,01	0,16 \pm 0,04	2,80 \pm 0,21	2,45 \pm 0,15	0,65 \pm 0,28	1,14 \pm 1,58	0,02 \pm 0,00	0,02 \pm 1,77
Abs	0,15 \pm 0,01	0,13 \pm 0,05	2,22 \pm 0,39	2,26 \pm 0,19	0,59 \pm 0,43	1,07 \pm 2,19	0,02 \pm 0,00	0,02 \pm 1,77
Aub	0,18 \pm 0,01	0,14 \pm 0,02	2,59 \pm 0,15	2,32 \pm 0,16	0,91 \pm 0,31	1,36 \pm 1,19	0,02 \pm 0,00	0,02 \pm 0,00
Bar	0,20 \pm 0,01	0,15 \pm 0,02	2,97 \pm 0,16	2,65 \pm 0,17	0,71 \pm 0,33	1,36 \pm 1,11	0,02 \pm 0,00	0,02 \pm 0,00
Fen	0,19 \pm 0,01	0,15 \pm 0,01	2,75 \pm 0,14	2,49 \pm 0,21	0,88 \pm 0,37	1,39 \pm 1,09	0,02 \pm 0,00	0,02 \pm 0,00
Lip	0,16 \pm 0,01	0,12 \pm 0,01	2,13 \pm 0,35	2,15 \pm 0,32	0,57 \pm 0,34	2,02 \pm 1,55	0,02 \pm 0,00	0,02 \pm 0,00
Res	0,22 \pm 0,01	0,13 \pm 0,01	2,99 \pm 0,19	2,22 \pm 0,19	0,43 \pm 0,25	1,54 \pm 1,08	0,02 \pm 0,00	0,02 \pm 0,00
Spo	0,21 \pm 0,01	0,17 \pm 0,05	2,93 \pm 0,14	2,37 \pm 0,14	0,41 \pm 0,20	0,94 \pm 1,27	0,02 \pm 0,00	0,02 \pm 0,00

Tabelle 4.5.: Mit dem Modell ohne Umweltresponse für den dritten Schnitt des ersten Versuchsjahres H_{1b} und den dritten Schnitt der Versuchswiederholung H_{3b} geschätzte sortenspezifische Modellparameter Wachstumsrate r_{\max} und Rohfaserneubildungsrate θ_F .

Sorte	H_{1b} $r_{\max} [d^{-1}]$	H_{3b} $r_{\max} [d^{-1}]$	H_{1b} $\theta_F [d^{-1}]$	H_{3b} $\theta_F [d^{-1}]$
Aba	0,09±0,00	0,06±0,01	0,01±0,00	0,01±0,00
Abs	0,08±0,00	0,05±0,01	0,01±0,00	0,01±0,00
Aub	0,08±0,01	0,05±0,01	0,01±0,00	0,01±0,00
Bar	0,07±0,00	0,06±0,01	0,01±0,00	0,01±0,00
Fen	0,08±0,01	0,05±0,01	0,01±0,00	0,01±0,00
Lip	0,08±0,00	0,05±0,01	0,01±0,00	0,01±0,00
Res	0,08±0,00	0,06±0,01	0,01±0,00	0,01±0,00
Spo	0,09±0,00	0,05±0,01	0,01±0,00	0,01±0,00

H_{3b} . Die für beide Versuche geschätzten Rohfaserneubildungsraten lagen lediglich für die Sorte Abersilo innerhalb ihrer Standardabweichungen, die allerdings auch für den dritten Aufwuchs allgemein klein waren. Mit Ausnahme der Sorte Abersilo wurden für H_{3b} etwas kleinere Rohfaserneubildungsraten geschätzt als für H_{1b} .

Die mit dem Modell mit einer integrierten Temperaturresponse für H_{3b} geschätzten Wachstumsraten lagen für die Sorten Abervon, Bargala, Fennema, Lipresso, Respect und Sponsor innerhalb der Standardabweichung der für H_{1b} geschätzten Wachstumsraten (Tabelle 4.6). Umgekehrt lagen die für H_{1b} geschätzten Wachstumsraten für die Sorten Bargala, Fennema, Lipresso, und Respect innerhalb der Standardabweichung der für H_{3b} geschätzten Wachstumsraten. Abgesehen von der Sorte Respect, die in H_{3b} eine etwas höhere Wachstumsrate hatte, wurden für alle Sorten für die Versuchswiederholung niedrigere Wachstumsraten geschätzt als für den ersten Versuch H_{1b} . Die für H_{3b} geschätzten Temperaturkoeffizienten lagen für alle Sorten innerhalb der Standardabweichung der für H_{1b} geschätzten Temperaturkoeffizienten. Allerdings hatten die für H_{1b} geschätzten Temperaturkoeffizienten z.T. sehr hohe Standardabweichungen von >100%. Die für H_{1b} geschätzten Temperaturkoeffizienten lagen lediglich für die Sorten Abersilo, Aubisque und Bargala innerhalb der Standardabweichung der für H_{3b} geschätzten Temperaturkoeffizienten. Insgesamt hatten alle Sorten in H_{3b} größere Temperaturkoeffizienten als in H_{1b} . Die für H_{3b} geschätzten Rohfaserneubildungsraten lagen für keine Sorte innerhalb der Standardabweichungen der für H_{1b} geschätzten Rohfaserneubildungsraten. Umgekehrt lagen die für H_{1b} geschätzten Rohfaserneubildungsraten für die Sorten Fennema und Respect innerhalb der Standardabweichung der für H_{3b} geschätzten Ra-

Tabelle 4.6.: Mit dem Modell mit integrierter Temperaturresponse für den dritten Schnitt des ersten Versuchsjahres H_{1b} und den dritten Schnitt der Versuchswiederholung H_{3b} geschätzte sortenspezifische Modellparameter Wachstumsrate r_{\max} , Temperaturkoeffizient Q_{10} und Rohfaserneubildungsrate θ_F .

Sorte	H_{1b} $r_{\max} [d^{-1}]$	H_{3b} $r_{\max} [d^{-1}]$	H_{1b} $Q_{10} [^{\circ}C^{-1}]$	H_{3b} $Q_{10} [^{\circ}C^{-1}]$	H_{1b} $\theta_F [d^{-1}]$	H_{3b} $\theta_F [d^{-1}]$
Aba	0,09±0,01	0,08±0,01	1,38±2,93	3,00±1,01	0,01±0,00	0,01±0,00
Abs	0,09±0,01	0,08±0,01	2,81±0,26	2,96±0,78	0,01±0,00	0,01±0,00
Aub	0,09±0,01	0,07±0,01	2,66±1,08	2,98±0,98	0,01±0,00	0,01±0,00
Bar	0,09±0,01	0,08±0,01	2,95±0,44	3,00±0,87	0,01±0,00	0,01±0,00
Fen	0,08±0,02	0,07±0,01	1,30±4,97	3,00±0,88	0,01±0,00	0,01±0,00
Lip	0,08±0,01	0,07±0,01	1,46±2,00	3,00±0,83	0,01±0,00	0,01±0,00
Res	0,08±0,01	0,08±0,01	1,30±3,37	3,00±0,83	0,01±0,00	0,01±0,00
Spo	0,09±0,02	0,07±0,01	1,30±5,32	3,00±1,22	0,01±0,00	0,01±0,00

ten. Auch die mit diesem Modell geschätzten Rohfaserneubildungsraten hatten allgemein kleine Standardabweichungen. Für H_{3b} wurden, wie auch mit dem Modell ohne Umweltresponse, außer für die Sorte Abersilo kleinere Rohfaserneubildungsraten geschätzt als für H_{1b} .

Die mit dem Modell mit integrierter Temperatur- und Bodenfeuchteresponse für H_{3a} geschätzten sortenspezifischen Wachstumsraten hatten einen Variationskoeffizienten von 13% und unterschieden sich somit fast genauso stark wie die für H_{1a} geschätzten Wachstumsraten. In beiden Versuchen hatten die frühen Sorten Lipresso und Abersilo die niedrigsten Wachstumsraten (Tabelle 4.4). In H_{1a} hatten die beiden späten Sorten Aberavon und Sponsor sowie die Sorte Respect die höchsten Wachstumsraten, ähnlich wie in H_{3a} , in dem ebenfalls die beiden späten Sorten Aberavon und Sponsor die größten Wachstumsraten hatten. Der Variationskoeffizient der geschätzten sortenspezifischen Temperaturkoeffizienten war hingegen für H_{3a} mit 7% deutlich kleiner als der für H_{1a} . Wie in H_{1a} , hatten auch in H_{3a} die beiden frühen Sorten Lipresso und Abersilo kleinere Temperaturkoeffizienten, allerdings war dies in H_{3a} weniger deutlich und auch für die Sorte Respect der Fall. Ähnliche Ergebnisse wurden für die Temperaturresponsen erzielt. Wie in H_{1a} , zeigten auch in H_{3a} die beiden frühen Sorten eine höhere Temperaturresponse für niedrige Temperaturen als die späteren Sorten, wobei auch dieser Unterschied in H_{3a} weniger deutlich war als in H_{1a} (Abbildung 4.10).

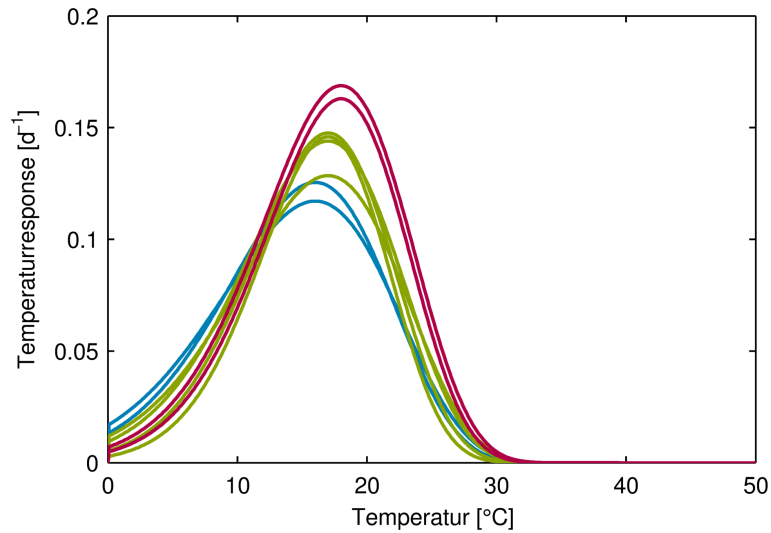


Abbildung 4.10.: Temperaturresponsen der *L. perenne*-Sorten während des ersten Aufwuchses 2013. Die Responsen der frühen Sorten sind in blau, die der mittleren Sorten in grün und die der späten Sorten in rot dargestellt.

4.3.3. Anhand gepoolter Daten identifizierte Prozesse und Parameter

Für den gepoolten Datensatz mit den Daten des ersten Aufwuchses des ersten Versuchsjahres H_{1a} und der Versuchswiederholung H_{3a} wurde anhand der berechneten AIC-Werte das Modell mit allen drei Umweltprozessen, der Temperatur-, Bodenfeuchte- und Strahlungsresponse, selektiert (Tabelle 4.7). Für den gepoolten Datensatz mit den Daten der dritten Aufwüchse H_{1b} und H_{3b} wurde das Modell mit einer Temperaturresponse selektiert.

Tabelle 4.8 gibt eine Übersicht über die für die ersten und dritten Aufwüchse aller drei Versuchsjahre H_1 bis H_3 und für die gepoolten Datensätze selektierten Umweltprozesse.

Das für die gepoolten Daten der ersten Aufwüchse H_{1a} und H_{3a} selektierte Modell mit allen drei Umweltprozessen - Temperatur-, Bodenfeuchte- und Globalstrahlungsresponse - konnte gut parametrisiert werden (Tabelle 4.9). Im Vergleich zur Parametrisierung dieses Modells anhand der einzelnen Versuche wurden insgesamt kleinere Standardabweichungen der sortenspezifisch geschätzten Parameter erreicht.

Tabelle 4.7.: AIC-Werte für das Ertragsmodell ohne integrierte Umweltprozesse sowie mit den Umweltprozessen Temperatur ϕ_T , Bodenfeuchte ϕ_M und/oder Globalstrahlung ϕ_R und unabhängige Anpassung an die gepoolten Ertragsdaten des ersten a und dritten Schnittes b des ersten Versuchsjahres H_1 und der Versuchswiederholung H_3 .

Versuch	Umweltprozess	AIC-Wert
$H_{1a} \cup H_{3a}$	-	-3439
$H_{1a} \cup H_{3a}$	ϕ_T	-3431
$H_{1a} \cup H_{3a}$	ϕ_M	-3378
$H_{1a} \cup H_{3a}$	ϕ_R	-3290
$H_{1a} \cup H_{3a}$	$\phi_T \times \phi_M$	-3436
$H_{1a} \cup H_{3a}$	$\phi_T \times \phi_R$	-3343
$H_{1a} \cup H_{3a}$	$\phi_M \times \phi_R$	-3413
$H_{1a} \cup H_{3a}$	$\phi_T \times \phi_M \times \phi_R$	-3473
$H_{1b} \cup H_{3b}$	-	-3816
$H_{1b} \cup H_{3b}$	ϕ_T	-3885
$H_{1b} \cup H_{3b}$	ϕ_M	-3795
$H_{1b} \cup H_{3b}$	ϕ_R	-3762
$H_{1b} \cup H_{3b}$	$\phi_T \times \phi_M$	-3834
$H_{1b} \cup H_{3b}$	$\phi_T \times \phi_R$	-3853
$H_{1b} \cup H_{3b}$	$\phi_M \times \phi_R$	-3741
$H_{1b} \cup H_{3b}$	$\phi_T \times \phi_M \times \phi_R$	-3781

Tabelle 4.8.: Anhand der AIC-Werte für die ersten a und dritten Aufwüchse b der Versuchsjahre H_1 - H_3 selektierte Umweltprozesse.

Versuch	Temperaturresponse ϕ_T	Bodenfeuchteresponse ϕ_M	Globalstrahlungsresponse ϕ_R
H_{1a}	×	×	
H_{1b}			
H_{2a}	×		×
H_{2b}		×	
H_{3a}		×	×
H_{3b}	×		
$H_{1a} \cup H_{3a}$	×	×	×
$H_{1b} \cup H_{3b}$	×		

Tabelle 4.9.: Für den gepoolten Datensatz mit den Daten des ersten Versuchsjahres H_1 und der Versuchswiederholung H_3 für den ersten Aufwuchs a geschätzte sortenspezifische Modellparameter Wachstumsrate r_{\max} , Temperaturkoeffizient Q_{10} , Parameter γ für die Bodenfeuchteresponse, Parameter β für die Strahlungsresponse und Rohfaserneubildungsrate θ_F , geschätzt mit dem Modell mit integrierter Temperatur-, Strahlungs- und Bodenfeuchteresponse.

Sorte	r_{\max} [d^{-1}]	Q_{10} [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	γ [% nFK^{-1}]	β [J cm^{-2}]	θ_F [d^{-1}]
Aba	0,21±0,02	2,35±0,13	1,10±0,47	2,29±0,58	0,01±0,00
Abs	0,18±0,02	2,07±0,19	1,20±0,70	1,94±0,48	0,02±0,00
Aub	0,19±0,01	2,34±0,10	0,94±0,31	3,27±0,29	0,01±0,00
Bar	0,19±0,01	2,65±0,12	1,95±0,52	2,53±0,53	0,01±0,00
Fen	0,19±0,01	2,61±0,15	1,31±0,63	3,37±0,31	0,01±0,00
Lip	0,15±0,01	2,26±0,23	2,00±0,64	3,38±0,63	0,01±0,00
Res	0,19±0,01	2,41±0,12	1,93±0,50	2,12±0,54	0,01±0,00
Spo	0,23±0,01	2,62±0,13	1,09±0,35	2,50±0,43	0,01±0,00

Dies trifft auch auf die für H_{1a} und H_{3a} selektierten Modelle zu: Die anhand des gepoolten Datensatzes mit dem Modell mit integrierter Strahlungs- und Bodenfeuchteresponse und mit dem Modell mit Temperatur- und Bodenfeuchteresponse geschätzten sortenspezifischen Parameter hatten generell kleinere Standardabweichungen als die anhand der einzelnen Datensätze geschätzten Parameter (Tabelle 4.10). Insbesondere traten keine Standardabweichungen $\geq 100\%$ für die Parameter β und γ mehr auf.

Die sortenspezifischen Parameter für den dritten Aufwuchs, geschätzt anhand des gepoolten Datensatzes mit dem Modell mit einer Temperaturresponse, hatten ebenfalls kleinere Standardabweichungen als die anhand der einzelnen Datensätze geschätzten Parameter (Tabelle 4.11). Auch traten hier keine hohen Standardabweichungen von $\geq 100\%$ für den Temperaturkoeffizienten Q_{10} mehr auf.

Die anhand des gepoolten Datensatzes für den ersten Aufwuchs mit dem Modell mit allen drei Umweltprozessen geschätzten sortenspezifischen Wachstumsraten hatten einen Variationskoeffizienten von 12%. Die beiden frühen Sorten Lipresso und Abersilo hatten die niedrigsten Wachstumsraten, während die beiden späten Sorten Sponsor und Aberavon die höchsten Wachstumsraten aufwiesen (Tabelle 4.9). Der Variationskoeffizient der geschätzten Temperaturkoeffizienten betrug 8%. Auch hier hatten die frühen Sorten Lipresso und Abersilo kleinere Temperaturkoeffizienten als die späteren Sorten.

Die anhand des gepoolten Datensatzes für den ersten Aufwuchs mit dem Modell mit inte-

Tabelle 4.10.: Für den gepoolten Datensatz mit den Daten des ersten Versuchsjahres H_1 und der Versuchswiederholung H_3 geschätzte sortenspezifische Modellparameter Wachstumsrate r_{\max} , Parameter β für die Strahlungsresponse, Temperaturkoeffizient Q_{10} , Parameter γ für die Bodenfeuchteresponse und Rohfaserneubildungsrate θ_F für den ersten Aufwuchs a , geschätzt mit dem Modell mit integrierter Strahlungs- und Bodenfeuchteresponse und dem Modell mit Temperatur- und Bodenfeuchteresponse.

Sorte	Modell mit Strahlung und Bodenfeuchte				Modell mit Temperatur und Bodenfeuchte			
	r_{\max} [d ⁻¹]	β [J cm ⁻²]	γ [% nFK ⁻¹]	θ_F [d ⁻¹]	r_{\max} [d ⁻¹]	Q_{10} [°C ⁻¹]	γ [% nFK ⁻¹]	θ_F [d ⁻¹]
Aba	0,17±0,02	1,74±0,62	0,85±0,45	0,01±0,00	0,17±0,01	2,43±0,09	0,99±0,40	0,02±0,00
Abs	0,16±0,01	2,19±0,44	0,65±0,27	0,02±0,00	0,12±0,01	2,17±0,17	2,53±1,16	0,02±0,00
Aub	0,14±0,01	3,97±0,93	0,91±0,39	0,02±0,00	0,17±0,01	2,22±0,12	0,55±0,18	0,02±0,00
Bar	0,14±0,01	2,30±0,55	1,73±0,84	0,02±0,00	0,15±0,00	2,63±0,12	2,23±0,79	0,02±0,00
Fen	0,15±0,02	4,35±1,51	0,56±0,35	0,01±0,00	0,15±0,01	2,44±0,13	1,84±0,81	0,02±0,00
Lip	0,13±0,01	3,33±0,65	1,45±0,74	0,02±0,00	0,13±0,01	2,28±0,24	2,83±1,15	0,02±0,00
Res	0,13±0,01	2,75±0,61	2,06±1,05	0,02±0,00	0,14±0,00	2,52±0,14	3,93±1,42	0,02±0,00
Spo	0,15±0,01	2,48±0,59	1,04±0,49	0,02±0,00	0,18±0,01	2,51±0,09	0,82±0,24	0,02±0,00

Tabelle 4.11.: Für den gepoolten Datensatz mit den Daten des ersten Versuchsjahres H_1 und der Versuchswiederholung H_3 geschätzte sortenspezifische Modellparameter Wachstumsrate r_{\max} , Temperaturkoeffizient Q_{10} und Rohfaserneubildungsrate θ_F für den dritten Aufwuchs b, geschätzt mit dem Modell mit integrierter Temperaturreponse.

Sorte	r_{\max} [d^{-1}]	Q_{10} [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	θ_F [d^{-1}]
Aba	$0,08 \pm 0,01$	$3,00 \pm 0,57$	$0,01 \pm 0,00$
Abs	$0,08 \pm 0,00$	$3,00 \pm 0,26$	$0,01 \pm 0,00$
Aub	$0,07 \pm 0,01$	$2,76 \pm 0,86$	$0,01 \pm 0,00$
Bar	$0,08 \pm 0,00$	$2,95 \pm 0,26$	$0,01 \pm 0,00$
Fen	$0,07 \pm 0,01$	$2,41 \pm 0,77$	$0,01 \pm 0,00$
Lip	$0,08 \pm 0,01$	$2,83 \pm 0,41$	$0,01 \pm 0,00$
Res	$0,08 \pm 0,01$	$2,65 \pm 0,46$	$0,01 \pm 0,00$
Spo	$0,08 \pm 0,01$	$2,79 \pm 0,64$	$0,01 \pm 0,00$

grierter Temperatur- und Bodenfeuchteresponse geschätzten sortenspezifischen Wachstumsraten hatten einen Variationskoeffizienten von 14% und unterschieden sich somit genauso stark wie im ersten Versuchsjahr und etwas stärker als in der Versuchswiederholung. Wie für die einzelnen Datensätze, hatten die beiden frühen Sorten Lipresso und Abersilo niedrigere Wachstumsraten als die späteren Sorten (Tabelle 4.10). Außerdem wiesen die beiden späten Sorten Aberavon und Sponsor die höchsten Wachstumsraten auf. Der Variationskoeffizient der geschätzten Temperaturkoeffizienten war mit 7% kleiner als im ersten Versuchsjahr und genauso groß wie in der Versuchswiederholung. Auch hier hatten die frühen Sorten Lipresso und Abersilo die kleinsten Temperaturkoeffizienten, wie auch im ersten Versuchsjahr und der Versuchswiederholung.

4.4. Diskussion

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Modellvalidierung für den ersten und dritten Schnitt des ersten Hauptnutzungsjahres diskutiert. Anschließend werden die für die Versuchswiederholung unabhängig identifizierten Prozesse und geschätzten Modellparameter näher betrachtet, bevor am Schluss auf die anhand gepoolter Daten identifizierten Prozesse und Parameter eingegangen wird.

4.4.1. Modellvalidierung

Die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung im ersten Aufwuchs der Versuchswiederholung konnte einigermaßen gut anhand des entwickelten Modells vorhergesagt werden, sowohl anhand des Modells mit allen drei Umweltbedingungen als auch anhand des für das erste Versuchsjahr selektierten Modells mit den dominantesten Umweltbedingungen. Somit ist es möglich, mit diesen Modellen mit sortenspezifisch geschätzten Modellparametern und den wichtigsten Umweltbedingungen die Ertrags- und Qualitätsentwicklung von *L. perenne*-Sorten im ersten Aufwuchs des ersten Hauptnutzungsjahres vorherzusagen.

Die Ertrags- und Qualitätsentwicklung der *L. perenne*-Sorten im dritten Aufwuchs der Versuchswiederholung konnte weniger gut anhand des für das erste Versuchsjahr selektierten Modells ohne Umweltresponse vorhergesagt werden. Ein Grund ist möglicherweise die starke Trockenheit im Sommer der Versuchswiederholung, die im dritten Aufwuchs zu einem eingeschränkten Biomassewachstum führte, am Standort Malchow sogar zu einem Ernteausfall. So konnten für diesen Standort keine Daten für die Parameterverifikation und Untersuchung der Modellunsicherheit für den dritten Aufwuchs herangezogen werden. Um das Modell auch für den dritten Aufwuchs des ersten Hauptnutzungsjahres zu validieren, sollten deshalb weitere Daten erhoben werden.

Des Weiteren ist die Wiederholung des zweiten Hauptnutzungsjahres erforderlich, um das Modell auch hierfür validieren zu können.

4.4.2. Unabhängig identifizierte Prozesse und geschätzte Parameter

Die AIC-basierte Auswahl eines Ertragsmodells mit integrierter Strahlungs- und Bodenfeuchteresponse für den ersten Aufwuchs der Versuchswiederholung zeigt, dass die sortenspezifische Ertragsentwicklung in diesem Zeitraum sowohl durch die Globalstrahlung als auch durch die Bodenfeuchte erklärt werden konnte. Dies kann, wie auch in den anderen Versuchsjahren, mit den Wetterbedingungen während dieser Ernteperiode begründet werden: So war der Beginn des Aufwuchses, als die Wurzellänge der Pflanzen noch gering war, von Trockenheit geprägt, die die Biomassezunahme einschränkte, besonders am Standort Asendorf. Deshalb konnte das sortenspezifische Wachstum durch

die Bodenfeuchte erklärt werden. Auf Grund der hohen Standardabweichungen des Parameters γ für die Bodenfeuchteresponse wird an dieser Stelle nicht auf Sortenunterschiede hinsichtlich der Bodenfeuchteresponses eingegangen. Die Temperatur hatte im Vergleich zum ersten Versuchsjahr insgesamt einen kleineren Temperaturbereich, sowohl im ersten Drittel des ersten Aufwuchses als auch im gesamten ersten Aufwuchs. Es traten keine Temperaturen unter 7°C auf, und zu Beginn des Aufwuchses gab es kaum Temperaturen unter 10°C , im Gegensatz zum ersten Versuchsjahr. Folglich hatten die frühen Sorten zu Beginn des Aufwuchses keinen Wachstumsvorteil. Außerdem gab es während des späteren Aufwuchses keine starken Temperatureinbrüche wie im zweiten Versuchsjahr, weshalb die frühen Sorten auch keinen Wachstumsvorteil zu Zeiten niedriger Temperaturen hatten. Somit konnte das sortenspezifische Wachstum im ersten Aufwuchs der Versuchswiederholung weniger gut durch die Temperatur erklärt werden als im ersten Versuchsjahr, als die frühen Sorten im kühlen Frühjahr ein stärkeres Wachstum zeigten als die späteren Sorten, und als im zweiten Versuchsjahr, als das Wachstum der frühen Sorten während auftretender Temperatureinbrüche weniger gehemmt wurde als das der späteren Sorten. Während des gesamten ersten Aufwuchses der Versuchswiederholung war die Globalstrahlung relativ gleich verteilt, d.h. niedrige, mittlere und hohe Strahlungswerte traten mit ähnlicher Häufigkeit auf, anders als im ersten und zweiten Versuchsjahr, als hohe Strahlungswerte zwischen 1500 und 2500 J cm^{-2} häufiger auftraten als niedrige Werte. Somit traten im ersten Aufwuchs der Versuchswiederholung auch häufiger niedrige Strahlungswerte auf als in den beiden anderen Jahren, auch zu Beginn des Aufwuchses. So konnte das sortenspezifische Wachstum durch die Globalstrahlung erklärt werden.

Die AIC-basierte Auswahl eines Ertragsmodells mit einer Temperaturresponse für den dritten Aufwuchs der Versuchswiederholung zeigt, dass die sortenspezifische Ertragsentwicklung in diesem Zeitraum durch die Temperatur erklärt werden konnte: Zu Beginn des Aufwuchses traten sehr hohe Temperaturen von $\geq 25^{\circ}\text{C}$ auf, die jenseits der sortenspezifisch festgelegten Temperaturoptima lagen. So wurde das Biomassewachstum der frühen Sorten mit einem niedrigeren Temperaturoptimum stärker durch die hohen Temperaturen eingeschränkt als das der späten Sorten mit einem höheren Temperaturoptimum. Auf Grund der großen Differenz zwischen den hohen Temperaturen zu Beginn des Aufwuchses und den festgelegten sortenspezifischen Temperaturoptima wäre dieser Effekt auch aufgetreten, wenn die tatsächlichen Temperaturoptima der Sorten von den vorgegebenen abwichen.

Für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung im ersten und dritten Aufwuchs des ersten Versuchsjahres und der Versuchswiederholung waren jeweils andere Umweltprozesse dominant. Dies bestätigt, dass die dominanten Umweltprozesse von den Wetterbedingungen abhängig sind, weshalb die Vorhersage des verdaulichen Ertrages im ersten Aufwuchs mit dem Modell mit allen drei Umweltprozessen erfolgen sollte.

Mit der Wiederholung des ersten Hauptnutzungsjahres konnte der im ersten Aufwuchs des ersten Versuchsjahres gefundene Zusammenhang zwischen der Reifezeit der Sorte und den sortenspezifisch geschätzten Wachstumsraten bestätigt werden. Demnach haben zumindest im ersten Aufwuchs des ersten Hauptnutzungsjahres frühe Sorten niedrigere Wachstumsraten als späte Sorten. Der im ersten Aufwuchs des ersten Versuchsjahres festgestellte Zusammenhang zwischen der Sortenreifezeit und den geschätzten Temperaturkoeffizienten war zwar in der Versuchswiederholung weniger deutlich, aber dennoch hatten auch in der Versuchswiederholung die frühen Sorten kleinere Temperaturkoeffizienten als die späten Sorten.

Die Ursachen für unterschiedliche Wachstumsraten und Temperaturrensen früher und später Sorten können zum einen genetisch bedingt sein, wie eine sortenspezifisch unterschiedliche optimale Wachstumstemperatur, welche bei frühen Sorten niedriger ist als bei späten, oder sortenspezifisch unterschiedliche Vernalisations- und Photoperiodenanprüche. So benötigen späte Sorten vermutlich eine größere Anzahl kühler Tage und eine größere Tageslänge für eine Umsteuerung auf reproduktives Wachstum. In pflanzen genetischen Untersuchungen wurden molekulare Marker identifiziert, die mit der Kältetoleranz von *L. perenne*-Sorten assoziiert sind (SKØT et al., 2002; SACKVILLE HAMILTON et al., 2002). Dabei wurde für Sorten, die aus Regionen mit niedrigen Wintertemperaturen stammen, eine höhere Kältetoleranz festgestellt als für Sorten aus wärmeren Gebieten. In anderen Studien konnten molekulare Marker identifiziert werden, die für den unterschiedlichen Zeitpunkt des Ährenschiebens von *L. perenne*-Sorten aus verschiedenen geografischen Regionen verantwortlich sind (SKØT et al., 2005). Unterschiedliche Wachstumsraten früher und später Sorten können aber auch auf die gegebenen Umweltbedingungen wie die Temperatur zurückgeführt werden, wie im ersten Versuchsjahr, als zu Beginn der Ernteperiode die Temperaturen niedrig waren und die frühen gegenüber den späten Sorten einen Wachstumsvorteil hatten, was sich auch in den Temperaturkoeffizienten widerspiegelte. Im Wiederholungsjahr hingegen waren die Temperaturen zu Beginn der Ernteperiode höher und deckten insgesamt einen kleineren Temperaturbereich ab, so dass die Sorten weniger unterschiedlich auf die Temperatur reagierten.

4.4.3. Anhand gepoolter Daten identifizierte Prozesse und Parameter

Durch das Poolen der Daten des ersten Versuchsjahres und der Versuchswiederholung wurde das Spektrum der Wetterbedingungen erweitert. Die Auswahl eines Ertragsmodells mit allen drei Umweltprozessen, Temperatur, Strahlung und Bodenfeuchte, für den Datensatz beider erster Aufwüchse, bestätigt die Ergebnisse für die einzelnen Versuche, in denen, abhängig von den herrschenden Wetterbedingungen, entweder die Temperatur und Bodenfeuchte oder die Strahlung und Bodenfeuchte die sortenspezifische Ertragsentwicklung am effizientesten erklärten. Die Auswahl eines Modells mit einer Temperaturresponse für den Datensatz beider dritter Aufwüchse der ersten Hauptnutzungsjahre bestätigt die Ergebnisse der Versuchswiederholung, in der die sortenspezifische Ertragsentwicklung von der Temperaturresponse wiedergegeben werden konnte.

Durch das Zusammenfassen der Daten für beide erste und dritte Aufwüchse der ersten Hauptnutzungsjahre konnte die Standardabweichung der sortenspezifisch geschätzten Modellparameter wesentlich verringert werden und somit auch die Modellunsicherheit. Um auch die anhand der gepoolten Datensätze geschätzten Parameter zu verifizieren, sollten weitere Feldversuche durchgeführt und Daten erhoben werden.

4.5. Schlussfolgerungen

Das für den ersten Aufwuchs des ersten Hauptnutzungsjahres sortenspezifisch parametrisierte Modell konnte anhand der Daten der Versuchswiederholung validiert werden, sowohl das Modell mit allen drei Umweltprozessen als auch das Modell mit den dominantesten Umweltprozessen. Somit sind sie geeignet, die Ertrags- und Qualitätsentwicklung von *L. perenne*-Sorten anhand der geschätzten sortenspezifischen Parameter und Wetterdaten vorherzusagen. Das für den dritten Aufwuchs des ersten Hauptnutzungsjahres selektierte Modell ohne Umweltresponse konnte dagegen weniger gut validiert werden, möglicherweise auf Grund starker Trockenheit in der Versuchswiederholung. Weitere Versuchswiederholungen zur Validierung der identifizierten Parameter sollten an möglichst verschiedenen Standorten durchgeführt werden, um unterschiedliche Wetterbedingungen berücksichtigen zu können. Dabei sollten die Ertrags- und Qualitätsmerkmale während

der Zeitreihenernten möglichst engmaschig erhoben werden, insbesondere beim dritten Aufwuchs im Sommer, wenn Umweltbedingungen wie die Temperatur weniger variieren als im Frühjahr. Des Weiteren sollten die Zeitreihenernten über einen längeren Zeitraum, der für alle Sorten über das Ertragsmaximum hinaus geht, durchgeführt werden, um für alle Sorten den Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrages sicher bestimmen zu können.

Durch die Wiederholung des ersten Hauptnutzungsjahres wurde bestätigt, dass die für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung dominanten Umweltprozesse von den Wetterbedingungen abhängen. Durch das Poolen der Daten des ersten Versuchsjahres und der Versuchswiederholung konnte das Spektrum der Wetterbedingungen erweitert werden. Die Auswahl eines Modells mit den Umweltprozessen Temperatur-, Bodenfeuchte- und Globalstrahlungsresponse für den ersten Aufwuchs lässt darauf schließen, dass die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung durch alle drei Umweltbedingungen erklärt werden kann.

Die sortenspezifischen Modellparameter Wachstumsrate und Temperaturkoeffizient spiegeln auch im ersten Aufwuchs der Versuchswiederholung die Reifezeit der *L. perenne*-Sorten wider. Somit konnte bestätigt werden, dass sich frühe und späte Sorten in ihrer Ertragsentwicklung und Temperaturreponse unterscheiden.

Kapitel 5.

Phänologische Entwicklungsstadien zum optimalen Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion

5.1. Einleitung

Zur Bestimmung des optimalen Schnittzeitpunkts wird in der Futterproduktion, vor allem für den ersten Schnitt, das phänologische Entwicklungsstadium der Gräser herangezogen. So gilt das Erreichen des Entwicklungsstadiums „Beginn des Ährenschiebens“ als optimaler Schnittzeitpunkt für den ersten Schnitt (GILLILAND et al., 1995), da hier bei schon recht hohem Ertrag noch eine gute Futterqualität vorliegt. Wie die Ergebnisse aus früheren Untersuchungen (HERRMANN et al., 2012; MCENIRY und O’KIELY, 2013; PROCHNOW et al., 2009) und in 3.3.4 zeigen, richtet sich der optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion in erster Linie nach dem Trockenmasseertrag und wird daher von den meisten Sorten deutlich nach dem „Beginn des Ährenschiebens“ erreicht. Ob der optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion ebenfalls mit einem bestimmten phänologischen Entwicklungsstadium einhergeht, ist bislang jedoch unbekannt.

Im folgenden Kapitel soll der Zusammenhang zwischen dem optimalen Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion - dem Zeitpunkt des maximalen verdaulichen Ertrages - und dem phänologischen Entwicklungsstadium untersucht werden. Dazu wurde das Entwicklungsstadium während des ersten Aufwuchses nach der allgemeinen BBCH-Skala (Bio-

logische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie, MEIER, 1997) und nach der MSC-Methode (Mean Stage by Count, MOORE et al., 1991) bestimmt und die Korrelation der Ergebnisse beider Bestimmungsmethoden untersucht. Des Weiteren wurde untersucht, ob nach einer der beiden Methoden ein größerer Zusammenhang zwischen Entwicklungsstadium und Rohfasergehalt als Merkmal für die Futterqualität sowie zwischen Entwicklungsstadium und verdaulichem Ertrag als Leistungsmerkmal für die Biogasproduktion vorhanden war. Schließlich wurden für beide Methoden und alle Sorten die Entwicklungsstadien identifiziert, mit denen der optimale Schnitzeitpunkt für die Biogasproduktion, der maximale verdauliche Ertrag, erreicht wurde. In diesem Zuge wurde auch untersucht, ob das Entwicklungsstadium „Beginn des Ährenschiebens“ (BBCH 51) für alle Sorten ein geeigneter Indikator für die optimale Futterqualität war.

Sowohl die Codes der BBCH-Skala als auch die Indices der MSC-Methode zur Beschreibung der phänologischen Entwicklungsstadien besitzen eine Nominal- und eine Ordinalskala, sind allerdings nicht metrisch. Trotzdem wurden Korrelationen berechnet, um u.a. den Zusammenhang zwischen Entwicklungsstadium und verdaulichem Ertrag zu untersuchen. Diese Berechnungen wurden jedoch mit dem Ziel durchgeführt, die Ergebnisse auf die Ordinalskala zu übertragen und Aussagen darüber treffen zu können, mit welchem Entwicklungsstadium der optimale Schnitzeitpunkt für die Futter- und Biogasproduktion erreicht wurde.

5.2. Material und Methoden

5.2.1. Versuch

Am Standort Braunschweig wurden im Rahmen des in 3.2.3 beschriebenen Zeitreihenerteversuchs für drei Jahre acht *L. perenne*-Sorten unterschiedlicher Reifezeit angebaut. In jedem Jahr wurde während des ersten Aufwuchses an zehn Ernteterminen von jeder Sorte der Trockenmasse- (TM-)Ertrag und der Rohfaser- (XF-)Gehalt bestimmt. Parallel dazu wurde von jeder Sorte das phänologische Entwicklungsstadium nach der allgemeinen BBCH-Skala und nach der MSC-Methode bestimmt. Dabei erfolgte die Bestimmung des BBCH-Codes wie üblich als eine Schätzung für die gesamte Parzelle, während die Berechnung des MSC-Indexes anhand von 50 Halmen aus einer Mischprobe der Parzelle

durchgeführt wurde.

5.2.2. Statistische Auswertung

Um zu untersuchen, ob die nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode bestimmten Entwicklungsstadien korrelieren, wurde für die BBCH- und MSC-Werte der ersten Aufwüchse für jedes der drei Versuchsjahre der Pearson-Korrelationskoeffizient berechnet. Außerdem wurden der Zeitpunkt des Stadiums „Beginn des Ährenschiebens“ (BBCH 51) sowie der Zeitpunkt des vergleichbaren Stadiums „Inflorescence emergence“ (MSC-Index 3,1) ermittelt.

Um zu bewerten, ob nach der BBCH-Skala oder der MSC-Methode ein größerer Zusammenhang zwischen Entwicklungsstadium und Rohfasergehalt sowie zwischen Entwicklungsstadium und verdaulichem Ertrag vorhanden war, wurden verschiedene funktionale Zusammenhänge, für jedes Jahr getrennt, untersucht und deren Bestimmtheitsmaße berechnet.

Zur Beurteilung der Vorhersagegenauigkeit des Rohfasergehaltes und des verdaulichen Ertrages in Abhängigkeit der nach beiden Methoden bestimmten Entwicklungsstadien wurden lineare Regressionen berechnet und anhand der Standardfehler der geschätzten Parameter Konfidenzintervalle erstellt.

Die statistische Auswertung wurde mit Hilfe des Statistikprogramms R (R Development Core Team 2004) durchgeführt.

5.3. Ergebnisse

Die Untersuchung verschiedener funktionaler Zusammenhänge zwischen den nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode bestimmten Entwicklungsstadien und dem Rohfasergehalt sowie dem verdaulichen Ertrag ergab die besten Ergebnisse für quadratische Modelle, weshalb im Folgenden die Ergebnisse für diese Modelle vorgestellt werden. Dabei wird jedoch nicht näher auf der Erklärbarkeit der quadratischen Zusammenhänge eingegangen.

Tabelle 5.1.: Bestimmtheitsmaße R^2 der linearen Modelle für den Zusammenhang zwischen Rohfasergehalt und den nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode bestimmten Entwicklungsstadien für die Versuchsjahre 2011-2013.

2011		2012		2013	
BBCH	MSC	BBCH	MSC	BBCH	MSC
0,94	0,93	0,88	0,84	0,91	0,89

5.3.1. Vergleich der bestimmten Entwicklungsstadien

Die nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode bestimmten Entwicklungsstadien zeigten eine enge Korrelation, der für jedes Jahr bestimmte Korrelationskoeffizient betrug 0,94 im Jahr 2011 und 2013 und 0,91 im Jahr 2012.

Die Bestimmung der phänologischen Entwicklungsstadien nach beiden Methoden führte jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen. Nach der BBCH-Skala wurde das Entwicklungsstadium „Beginn des Ährenschiebens“ (BBCH 51) im Mittel sechs bis sieben Tage früher erreicht als das vergleichbare Stadium „Inflorescence emergence“ (MSC-Index 3,1) der MSC-Methode. Während nach der BBCH-Skala bereits das Stadium „Beginn des Ährenschiebens“ erreicht war, befand sich nach der MSC-Methode die Mehrheit der Blütenstände noch in der Blattscheide (MSC-Index 2,6-2,9). Umgekehrt wurde nach der BBCH-Skala bereits das Stadium „Ende des Ährenschiebens“ (BBCH 54-57) bonitiert, während sich die Pflanzen nach der MSC-Bestimmung noch im Stadium „Inflorescence emergence“ befanden.

5.3.2. Zusammenhang der Entwicklungsstadien mit der Futterqualität

Sowohl die nach der BBCH-Skala als auch die nach der MSC-Methode bestimmten Entwicklungsstadien zeigten einen engen Zusammenhang mit dem Rohfasergehalt. Für den Zusammenhang zwischen den nach der BBCH-Skala bestimmten Entwicklungsstadien und dem Rohfasergehalt wurden allerdings in jedem der drei Jahre etwas höhere Bestimmtheitsmaße berechnet (Tabelle 5.1).

Das Konfidenzintervall für den Rohfasergehalt zum Entwicklungsstadium „Beginn des

Tabelle 5.2.: Konfidenzintervalle für den Rohfasergehalt zum Entwicklungsstadium „Beginn des Ährenschiebens“ nach der BBCH-Skala (BBCH 51) und zum Stadium „Inflorescence emergence“ nach der MSC-Methode (MSC-Index 3,1) für jedes der drei Versuchsjahre.

2011		2012		2013	
BBCH 51	MSC 3,1	BBCH 51	MSC 3,1	BBCH 51	MSC 3,1
6,42%	6,90%	7,26%	8,46%	5,60%	6,10%

Tabelle 5.3.: Bestimmtheitsmaße R^2 der linearen Modelle für den Zusammenhang zwischen dem verdaulichen Ertrag und den nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode bestimmten Entwicklungsstadien für die Versuchsjahre 2011-2013.

2011		2012		2013	
BBCH	MSC	BBCH	MSC	BBCH	MSC
0,85	0,86	0,88	0,87	0,89	0,85

Ährenschiebens“ nach der BBCH-Skala (BBCH 51) war in allen drei Jahren etwas kleiner als das Konfidenzintervall zum Entwicklungsstadium „Inflorescence emergence“ nach der MSC-Methode (MSC-Index 3,1) (Abbildung 5.1 und Tabelle 5.2).

5.3.3. Zusammenhang der bestimmten Entwicklungsstadien mit dem verdaulichen Ertrag

Die nach der BBCH-Skala und die nach der MSC-Methode bestimmten Entwicklungsstadien zeigten ebenfalls einen engen Zusammenhang mit dem verdaulichen Ertrag. Im ersten Versuchsjahr war dieser Zusammenhang für die nach der MSC-Methode bestimmten Entwicklungsstadien etwas größer, während er in den anderen beiden Versuchsjahren für die nach der BBCH-Skala bestimmten Stadien größer war (Tabelle 5.3).

Das Konfidenzintervall für den verdaulichen Ertrag zum Entwicklungsstadium „Beginn des Ährenschiebens“ nach der BBCH-Skala (BBCH 51) war im ersten Versuchsjahr etwas größer als das Konfidenzintervall zum Entwicklungsstadium „Inflorescence emergence“ nach der MSC-Methode (MSC-Index 3,1), während es in den anderen beiden Versuchsjahren etwas kleiner war (Abbildung 5.2 und Tabelle 5.4).

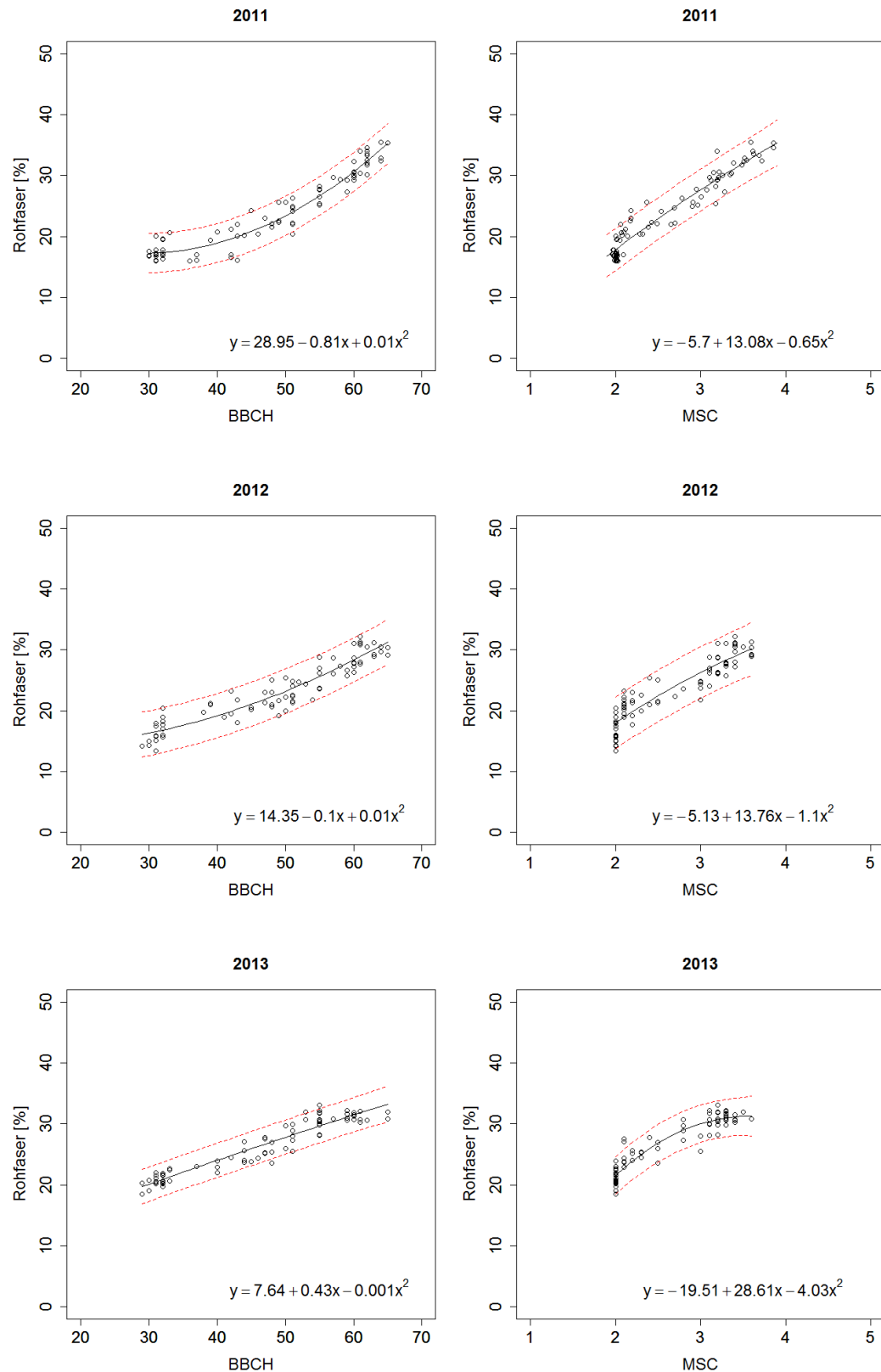


Abbildung 5.1.: Rohfasergehalt der angebauten *L. perenne*-Sorten in Abhängigkeit vom BBCH-Code und vom MSC-Index im ersten, zweiten und dritten Versuchsjahr.

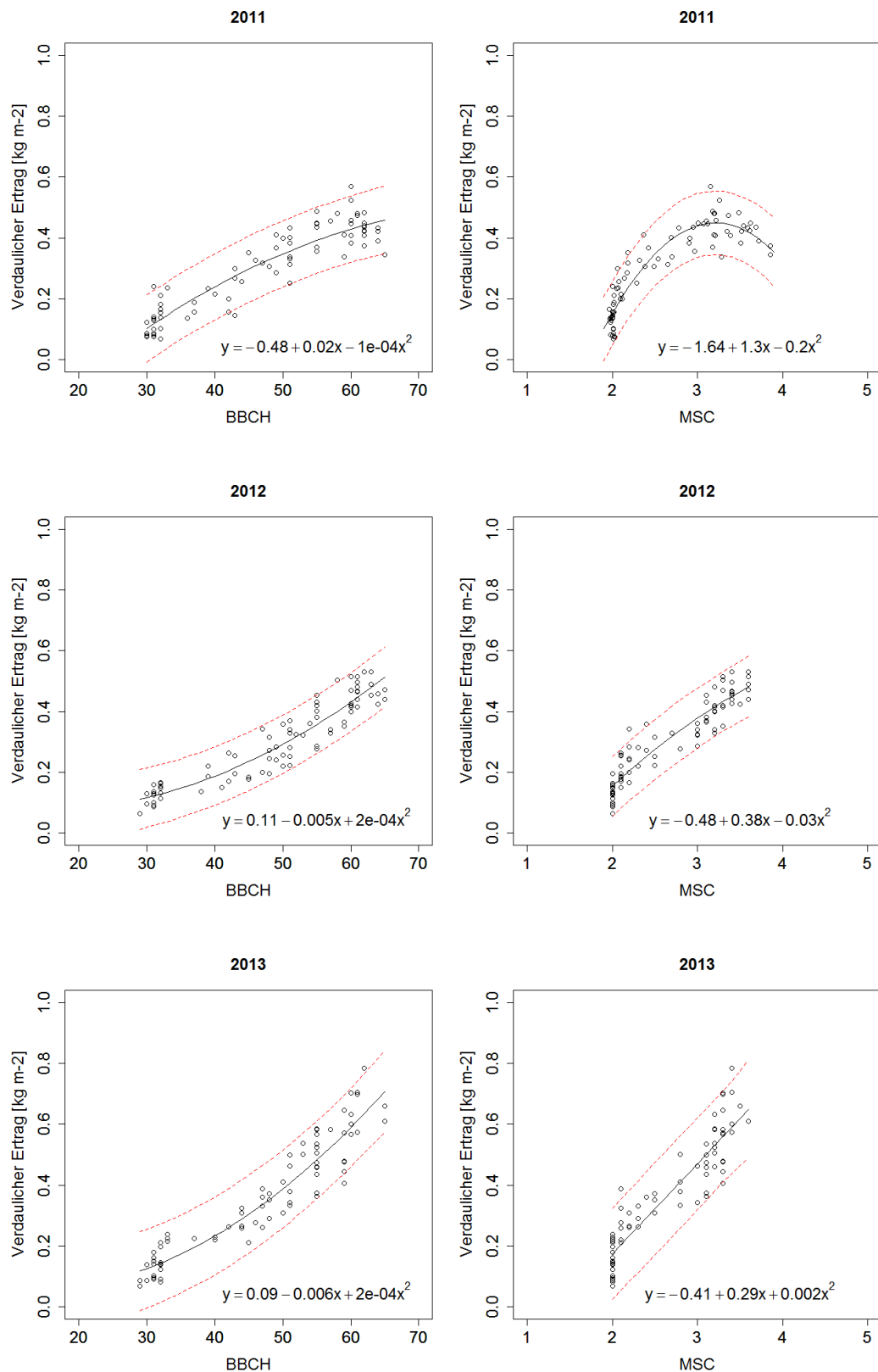


Abbildung 5.2.: Verdaulicher Ertrag der angebauten *L. perenne*-Sorten in Abhängigkeit vom BBCH-Code und vom MSD-Index im ersten, zweiten und dritten Versuchsjahr.

Tabelle 5.4.: Konfidenzintervalle für den verdaulichen Ertrag zum Entwicklungsstadium „Beginn des Ährenschiebens“ nach der BBCH-Skala (BBCH 51) und zum Entwicklungsstadium „Inflorescence emergence“ nach der MSC-Methode (MSC-Index 3,1) für jedes der drei Versuchsjahre.

2011		2012		2013	
BBCH 51	MSC 3,1	BBCH 51	MSC 3,1	BBCH 51	MSC 3,1
0,22 kg m ⁻²	0,21 kg m ⁻²	0,19 kg m ⁻²	0,20 kg m ⁻²	0,25 kg m ⁻²	0,30 kg m ⁻²

5.3.4. Entwicklungsstadien zum Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrag

Sowohl nach der BBCH-Skala als auch nach der MSC-Methode wurde der maximal verdauliche Ertrag von den untersuchten Sorten mit unterschiedlichen Entwicklungsstadien erreicht (Tabelle 5.5). Generell wurde nach der BBCH-Skala der maximal verdauliche Ertrag mit einem fortgeschritteneren Entwicklungsstadium erreicht als nach der MSC-Methode. So befanden sich die Gräser im ersten Versuchsjahr zum Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrages nach der BBCH-Skala im Mittel im Stadium „Ende des Ährenschiebens“ (BBCH 59), während sie sich nach der MSC-Methode im Mittel erst zwischen dem Stadium „Inflorescence emergence“ und „Spikelets fully emerged“ (MSC-Index 3,2) befanden. Im zweiten und dritten Versuchsjahr hatten die Gräser zum Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrages nach der BBCH-Skala im Mittel das Stadium „Beginn der Blüte“ (BBCH 61) erreicht, während sie nach der MSC-Methode im zweiten Versuchsjahr erst das Stadium zwischen „Spikelets fully emerged“ und „Inflorescence emerged“ (MSC-Index 3,4) und im dritten Versuchsjahr das Stadium „Inflorescence emerged“ (MSC-Index 3,5) erreicht hatten. Im Hinblick auf die Reifezeit der Sorten befanden sich nach beiden Bestimmungsmethoden die frühen Sorten zum Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrages in einem fortgeschritteneren Entwicklungsstadium als die späten Sorten (Abbildung 5.3).

Das Konfidenzintervall für den verdaulichen Ertrag zum mittleren Entwicklungsstadium des maximal verdaulichen Ertrages nach der BBCH-Skala (BBCH 59-61) war im ersten Versuchsjahr etwas größer als das Konfidenzintervall zum mittleren Entwicklungsstadium des maximal verdaulichen Ertrages nach der MSC-Methode (MSC-Index 3,2-3,5), während es in den anderen beiden Versuchsjahren etwas kleiner war (Tabelle 5.6).

Tabelle 5.5.: Entwicklungsstadien der untersuchten *L. perenne*-Sorten, bestimmt nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode, zum Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrages.

Sorte	Erntegruppe	2011		2012		2013	
		BBCH	MSC	BBCH	MSC	BBCH	MSC
Lipresso	früh	61	3,4	61	3,4	65	3,5
Abersilo	früh	60	3,2	65	3,6	65	3,6
Aubisque	mittel	58	3,2	63	3,6	61	3,4
Respect	mittel	60	3,1	62	3,4	61	3,3
Bargala	mittel	57	3,1	61	3,4	60	3,3
Fennema	mittel	60	3,3	61	3,6	62	3,4
Aberavon	spät	55	3,1	60	3,4	55	3,2
Sponsor	spät	61	3,2	58	3,3	60	3,2

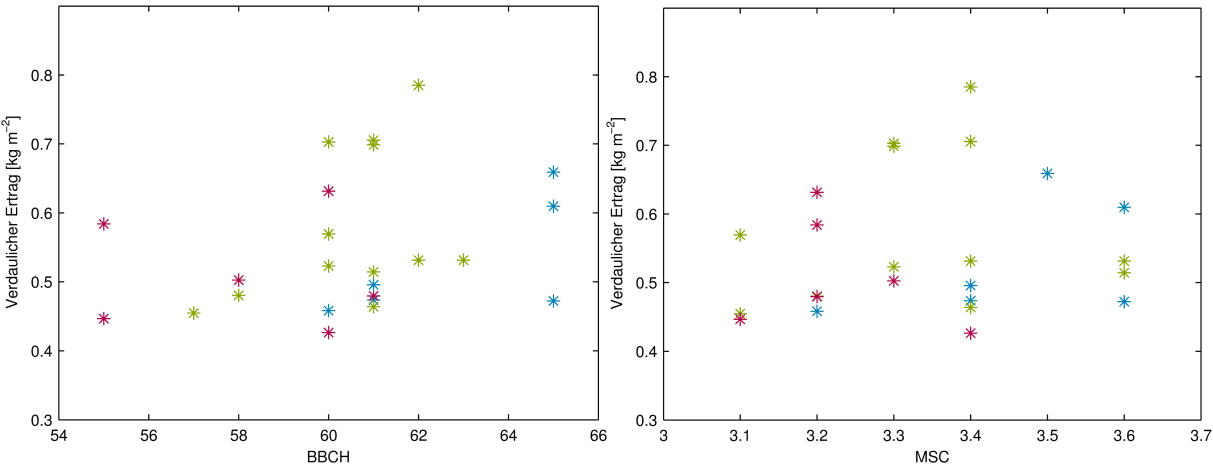


Abbildung 5.3.: Maximal verdaulicher Ertrag der frühen (blau), mittleren (grün) und späten (rot) *L. perenne*-Sorten und ihr erreichtes Entwicklungsstadium nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode in den Versuchsjahren 2011-2013.

Tabelle 5.6.: Konfidenzintervalle für den verdaulichen Ertrag zum mittleren Entwicklungsstadium des maximal verdaulichen Ertrages nach der BBCH-Skala (BBCH 59-61) und der MSC-Methode (MSC-Index 3,2-3,5) für jedes der drei Versuchsjahre.

2011		2012		2013	
BBCH 59	MSC 3,2	BBCH 61	MSC 3,5	BBCH 61	MSC 3,4
0,22 kg m ⁻²	0,21 kg m ⁻²	0,19 kg m ⁻²	0,20 kg m ⁻²	0,26 kg m ⁻²	0,30 kg m ⁻²

5.3.5. Entwicklungsstadien zum Zeitpunkt der optimalen Futterqualität

Auch die optimale Futterqualität, die mit einem Rohfasergehalt von 21-23% einher geht (KORNHER und TAUBE, 2008), wurde von den untersuchten Sorten sowohl nach der BBCH-Skala als auch nach der MSC-Methode mit unterschiedlichen Entwicklungsstadien erreicht (Tabelle 5.7). Wie beim maximal verdaulichen Ertrag, wurde auch die optimale Futterqualität nach der BBCH-Skala mit einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium erreicht als nach der MSC-Methode: Im ersten Versuchsjahr hatten die Sorten zum Zeitpunkt der optimalen Futterqualität nach der BBCH-Skala im Mittel das Stadium „Ende des Ährenschwellens“ (BBCH 48) erreicht, während sie sich nach der MSC-Methode noch im Längenwachstum (MSC-Index 2,0-2,9) befanden. Im zweiten Versuchsjahr befanden sich die Gräser zum Zeitpunkt der optimalen Futterqualität nach der BBCH-Skala im Mittel zwischen den Makrostadien „Ährenschwellen“ (BBCH 40-49) und „Ährenschieben“ (BBCH 51-59), während sie sich nach der MSC-Methode, wie im Vorjahr, noch im Längenwachstum befanden. Im dritten Versuchsjahr befanden sich die Gräser zum Zeitpunkt der optimalen Futterqualität nach der BBCH-Skala im Mittel in der Mitte des Makrostadiums „Längenwachstum“ (BBCH 31-39), während sie nach der MSC-Methode im Mittel erst den Beginn des Längenwachstums (MSC-Index 2,0) erreicht hatten. Im Hinblick auf die Reifezeit der Sorten erreichten nach beiden Bestimmungsmethoden die frühen Sorten die optimale Futterqualität mit einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium als die späten Sorten (Abbildung 5.4). Dabei befanden sich in den ersten beiden Versuchsjahren lediglich die frühen und einige mittlere Sorten zum Zeitpunkt der optimalen Futterqualität im Stadium „Beginn des Ährenschiebens“ (BBCH 51), dem üblichen Schnittzeitpunkt für die Futterproduktion, während die späten Sorten dieses Stadium noch nicht erreicht hatten. Im dritten Versuchsjahr befanden sich alle Sorten zum Zeitpunkt der optimalen Futterqualität in einem früheren Stadium als BBCH 51.

5.4. Diskussion

Im Folgenden werden zunächst die unterschiedlichen Ergebnisse der Entwicklungsstadienbestimmung nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode diskutiert. Anschließend

Tabelle 5.7.: Entwicklungsstadien der untersuchten *L. perenne*-Sorten, bestimmt nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode zum Zeitpunkt des optimalen Rohfaser- (XF-)Gehaltes.

Sorte	Erntegruppe	2011			2012			2013		
		BBCH	MSC	XF [%]	BBCH	MSC	XF [%]	BBCH	MSC	XF [%]
Lipresso	früh	51	2,7	22,18	51	2,5	21,55	40	2,0	21,99
Abersilo	früh	51	2,6	21,98	51	2,5	21,35	37	2,0	23,03
Aubisque	mittel	49	2,4	22,29	54	3,0	21,77	33	2,0	20,65
Respect	mittel	48	2,5	22,05	48	2,2	23,02	33	2,0	22,44
Bargala	mittel	49	2,2	22,50	51	2,7	22,32	31	2,0	20,54
Fennema	mittel	48	2,4	21,58	51	2,3	22,57	33	2,0	22,72
Aberavon	spät	47	2,2	23,05	49	2,2	21,67	40	2,1	22,87
Sponsor	spät	43	2,1	22,04	47	2,2	22,97	32	2,0	21,82

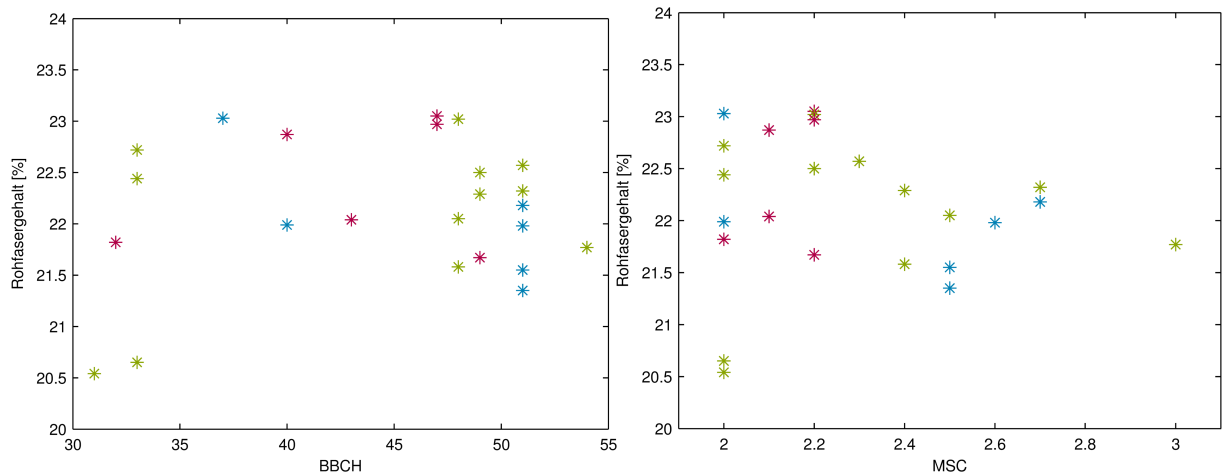


Abbildung 5.4.: Optimaler Rohfasergehalt der frühen (blau), mittleren (grün) und späten (rot) *L. perenne*-Sorten und ihr erreichtes Entwicklungsstadium nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode in den Versuchsjahren 2011-2013.

wird auf den Zusammenhang der nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode bestimmten Entwicklungsstadien mit der Futterqualität und dem verdaulichen Ertrag eingegangen. Schließlich sollen sowohl die Entwicklungsstadien zum Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrages als auch zum Zeitpunkt der optimalen Futterqualität näher betrachtet werden, auch im Hinblick auf Sortenunterschiede.

5.4.1. Vergleich der bestimmten Entwicklungsstadien

Trotz der hohen Korrelation zwischen den nach der BBCH-Skala und der MSC-Methode bestimmten Entwicklungsstadien führten beide Methoden zu unterschiedlichen Ergebnissen. Der Grund dafür sind unterschiedliche Definitionen der Entwicklungsstadien in beiden Methoden: Während z.B. nach der BBCH-Skala das Stadium „Beginn des Ährenschiebens“ (BBCH 51) erreicht ist, wenn „bei ca. 25% der Pflanzen die Blütenstände eben sichtbar“ sind (MEIER, 1997), wird das vergleichbare Stadium „Inflorescence emergence“ (MSC-Index 3,1) nach der MSC-Methode erst erreicht, wenn die Mehrzahl der einzeln untersuchten Halme die Ährenspitze zeigt. Dies führt zu einer zeitlichen Verschiebung der gleichen, nach beiden Methoden bestimmten, phänologischen Entwicklungsstadien.

5.4.2. Zusammenhang der bestimmten Entwicklungsstadien mit der Futterqualität und dem verdaulichen Ertrag

Die nach beiden Methoden bestimmten Entwicklungsstadien zeigten einen engen Zusammenhang sowohl mit dem Rohfasergehalt als auch mit dem verdaulichen Ertrag. Insgesamt war dieser Zusammenhang für die nach der BBCH-Skala bestimmten Entwicklungsstadien etwas größer als für die nach der MSC-Methode bestimmten Entwicklungsstadien. Außerdem konnten auf Grund schmalerer Konfidenzintervalle in jedem der Versuchsjahre Rohfasergehalt und verdaulicher Ertrag für die nach der BBCH-Skala bestimmten Entwicklungsstadien etwas genauer vorhergesagt werden als für die nach der MSC-Methode bestimmten Entwicklungsstadien. Somit erwies sich die Bestimmung der phänologischen Entwicklungsstadien nach der BBCH-Skala als die etwas genauere Methode.

Am Standort Braunschweig wurde der maximal verdauliche Ertrag im zweiten und dritten Versuchsjahr von den meisten Sorten erst am Ende der Zeitreihenernte erreicht, während er im ersten Versuchsjahr im Laufe der Zeitreihenernte von fast allen Sorten überschritten wurde. Deshalb zeigte sich der maximal verdauliche Ertrag in der linearen Regression zwischen Entwicklungsstadium und verdaulichem Ertrag nur im ersten Versuchsjahr als Wendepunkt. Daraus lässt sich schließen, dass der maximal verdauliche Ertrag nur im ersten Versuchsjahr sicher bestimmt werden konnte, während im zweiten und dritten Versuchsjahr die Durchführung der Zeitreihenernte über einen längeren Zeitraum erforderlich gewesen wäre, um den maximal verdaulichen Ertrag sicher zu bestimmen. Trotzdem wurden zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem optimalen Schnitzeitpunkt für die Biogasproduktion und dem phänologischen Entwicklungsstadium die Daten des Standortes Braunschweig verwendet, da hier die Bestimmung des Entwicklungsstadiums nach MSC-Methode an frisch geerntetem Pflanzenmaterial durchgeführt wurde und somit zuverlässiger war. Für die Ergebnisinterpretation wird vorausgesetzt, dass im zweiten und dritten Versuchsjahr das Überschreiten des Ertragsmaximums und somit der Wendepunkt kurz bevor stand.

5.4.3. Entwicklungsstadien zum Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrag

In jedem der drei Versuchsjahre wurde der maximal verdauliche Ertrag von allen Sorten nach dem Entwicklungsstadium „Beginn des Ährenschiebens“ erreicht. Somit konnten die Ergebnisse von HERRMANN et al. (2012); MCENIRY und O’KIELY (2013); PROCHNOW et al. (2009) bestätigt werden, nach denen der optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion später liegt als der für die Futterproduktion. Der Grund dafür ist, dass sich der optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion im Vergleich mehr nach dem Trockenmasseertrag richtet und weniger nach der Futterqualität. Auf Grund der unterschiedlichen Definitionen der Entwicklungsstadien in beiden Methoden (siehe 5.4.1) wurde der maximal verdauliche Ertrag nach der BBCH-Skala im Mittel aller untersuchten Sorten zu einem fortgeschritteneren Stadium erreicht als nach der MSC-Methode. Allerdings befanden sich die Sorten zum Zeitpunkt ihres maximal verdaulichen Ertrages in unterschiedlichen Stadien, sowohl nach der BBCH-Skala als auch nach der MSC-Methode. Nach der BBCH-Skala wurde der maximal verdauliche Ertrag über alle drei Versuchsjahre zwischen dem Stadium „Mitte des Ährenschiebens“ (BBCH 55) und dem Stadium „Vollblüte“ (BBCH 65) erreicht. Nach der MSC-Methode wurde er zwischen dem Stadium „Inflorescence emergence“ (MSC-Index 3,1) und dem Stadium „Inflorescence emerged“ (MSC-Index 3,5) bis „Anther emergence“ (MSC-Index 3,7) erreicht. Obwohl der Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrages mit keiner der untersuchten Methoden einem bestimmten Entwicklungsstadium zugeordnet werden konnte, erreichten die frühen Sorten tendenziell mit einem fortgeschritteneren Entwicklungsstadium ihren maximal verdaulichen Ertrag als die späten Sorten. Daraus lässt sich schließen, dass frühe Sorten in ihrer Phänologie den späteren Sorten zwar zeitlich voraus sind, aber erst mit fortgeschrittenerem Entwicklungsstadium die höchsten Trockenmasseerträge bzw. verdaulichen Erträge erreichen. Dies bestätigt auch die Ergebnisse von 3.3.4, die auf modellierten verdaulichen Erträgen beruhen, nach denen der Zeitraum zwischen dem für die Futterproduktion üblichen Schnittzeitpunkt zum Stadium „Beginn des Ährenschiebens“ und dem für die Biogasproduktion optimalen Schnittzeitpunkt zum Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrags für die frühen Sorten deutlich größer war als für die späten Sorten.

5.4.4. Entwicklungsstadien zum Zeitpunkt der optimalen Futterqualität

Die optimale Futterqualität mit einem Rohfasergehalt von 21-23% wurde lediglich in den ersten beiden Versuchsjahren und von den frühen und einigen mittleren Sorten zum Entwicklungsstadium „Beginn des Ährenschiebens“ (BBCH 51), dem üblichen Schnittzeitpunkt für die Futterproduktion, erreicht. Vor allem die späten Sorten befanden sich zum Zeitpunkt der optimalen Futterqualität in einem früheren Stadium. Dies kann mit der unterschiedlichen phänologischen Entwicklung früher und später Sorten erklärt werden: Frühe Sorten sind in ihrer phänologischen Entwicklung im Vergleich zu späten Sorten weiter fortgeschritten. So treten sie z.B. früher in die Phase des reproduktiven Wachstums ein als späte Sorten, wenn sie erst vergleichsweise wenig Rohfaser gebildet haben. Währenddessen erreichen späte Sorten die reproduktive Phase zu einem späteren Zeitpunkt, wenn sie bereits einen höheren Rohfasergehalt aufweisen. Wie beim maximal verdaulichen Ertrag, wurde auch die optimale Futterqualität auf Grund der unterschiedlichen Definitionen der Entwicklungsstadien in beiden Methoden (siehe 5.4.1) nach der BBCH-Skala im Mittel aller untersuchten Sorten zu einem fortgeschritteneren Stadium erreicht als nach der MSC-Methode.

5.5. Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass das phänologische Entwicklungsstadium, bestimmt nach der BBCH-Skala und nach der MSC-Methode, einen engen Zusammenhang sowohl mit der Futterqualität als auch mit dem verdaulichen Ertrag aufwies. Insgesamt war dieser Zusammenhang für die nach der BBCH-Skala bestimmten Entwicklungsstadien etwas größer, was neben der einfacheren Durchführbarkeit für diese Methode spricht. Trotz der engen Zusammenhänge beider Methoden mit der Futterqualität und dem verdaulichen Ertrag und einer hohen Korrelation der bestimmten Entwicklungsstadien wurden mit beiden Methoden die gleichen phänologischen Entwicklungsstadien zu unterschiedlichen Zeitpunkten bestimmt, was auf Unterschiede in der Definition der Entwicklungsstadien zurückzuführen ist. Der optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion, der Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrages, wurde von allen Sorten nach dem für die Futterproduktion üblichen Schnittzeitpunkt, dem Zeitpunkt des Entwicklungsstadiums

„Beginn des Ährenschiebens“ (BBCH 51), erreicht. Jedoch konnte er weder nach der BBCH-Skala noch nach der MSC-Methode einem bestimmten Entwicklungsstadium zugeordnet werden. Tendenziell erreichten die frühen Sorten ihren maximalen verdaulichen Ertrag mit einem fortgeschrittenerem Stadium als die späten Sorten. Das Entwicklungsstadium „Beginn des Ährenschiebens“ (BBCH 51) erwies sich nur für die frühen und einige mittlere Sorten in den ersten beiden Versuchsjahren als geeigneter Indikator für die optimale Futterqualität. Auf Grund der unterschiedlichen phänologischen Entwicklung erreichten die späten Sorten den Zeitpunkt der optimalen Futterqualität bereits mit einem früheren Entwicklungsstadium.

Kapitel 6.

Schlussbetrachtung

Das Ziel dieser Arbeit war die Bestimmung und Vorhersage des optimalen Schnittzeitpunkts von *Lolium perenne*-Sorten für die Biogasproduktion anhand eines Modells für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung. Dabei sollte ein besonderes Augenmerk auf der Untersuchung von Sortenunterschieden liegen.

In Kapitel 2 wurde zunächst anhand eines zweijährigen Feldversuchs mit 20 *L. perenne*-Sorten unterschiedlicher Reifezeit gezeigt, dass der Schnittzeitpunkt im ersten Schnitt beider Hauptnutzungsjahre sowohl den Ertrag als auch die Qualität der Sorten signifikant beeinflusst hat, wenn die Schnitttermine eine Differenz von mindestens 6 Tagen aufwiesen. In diesem Fall waren die Pflanzen zu dem späteren Schnitttermin in ihrer phänologischen Entwicklung soweit fortgeschritten, dass sie auch einen höheren Trockenmasseertrag gebildet hatten, der allerdings mit einer niedrigeren Grasqualität einherging.

Auf den jährlichen Gesamtertrag hatte der Schnittzeitpunkt jedoch keinen signifikanten Einfluss, da der Zeitpunkt des ersten Schnittes auch den Ertrag des Folgeschnittes beeinflusst, wodurch durch unterschiedliche Schnittzeitpunkte erreichte Ertragsunterschiede im ersten Schnitt durch die Erträge im Nachwuchs ausgeglichen werden können. Allerdings kann mit einem späten ersten Schnitt und einer Reduzierung der Folgeschnitte auch ein höherer Jahresertrag erreicht werden.

Das in Kapitel 3 vorgestellte Modell zeigte sich geeignet, *L. perenne*-Sorten auf der Basis von Ertrag, Qualität und Umweltresponse zu charakterisieren und den für die Biogaspro-

duktion optimalen Schnittzeitpunkt zu bestimmen. Die sortenspezifischen Modellparameter spiegelten Unterschiede in der Reifezeit und Trockentoleranz wider. Der modellbasiert optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion wurde von den untersuchten *L. perenne*-Sorten im Mittel etwa zwei Wochen nach dem für die Futterproduktion üblichen Schnittzeitpunkt erreicht, womit auch ein im Vergleich zum üblichen Schnittzeitpunkt erhöhter verdaulicher Ertrag einherging. Insgesamt unterschieden sich die Sorten in ihrem modellbasiert optimalen Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion weniger als in ihrem für die Futterproduktion üblichen Schnittzeitpunkt.

In Abhängigkeit von den Wetterbedingungen erwiesen sich unterschiedliche Umweltprozesse als dominant für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung. Dennoch konnte für den ersten Aufwuchs das Modell mit einer Temperatur-, Globalstrahlungs- und Bodenfeuchteresponse sortenspezifisch parametrisiert werden. Somit können in einer laufenden Vegetationsperiode mit bekanntem Wachstumsbeginn und der Einbeziehung von Wettervorhersagedaten mit Hilfe des Modells der verdauliche Ertrag und der optimale Schnittzeitpunkt für einen erhöhten Biogasertrag sortenspezifisch vorhergesagt werden.

Obwohl das vorgestellte Modell vor dem Hintergrund der Biogasproduktion entwickelt wurde, kann es unabhängig von der Grasverwertung eingesetzt werden, da mit dem Modell die sortenspezifische Entwicklung einzelner Ertrags- und Qualitätsmerkmale simuliert wird.

In Kapitel 4 konnte das für das erste Hauptnutzungsjahr sortenspezifisch parametrisierte Modell anhand der Daten einer Versuchswiederholung validiert werden, wobei das Modell für den ersten Aufwuchs besser validiert werden konnte als das für den dritten Aufwuchs.

Durch die Wiederholung des ersten Hauptnutzungsjahres wurde bestätigt, dass die für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung dominanten Umweltprozesse von den Wetterbedingungen abhängen. Deshalb sollten für die sortenspezifische Vorhersage des verdaulichen Ertrages im ersten Aufwuchs alle drei Umweltprozesse - Temperatur-, Bodenfeuchte- und Globalstrahlungsresponse - berücksichtigt werden.

Die sortenspezifischen Modellparameter Wachstumsrate und Temperaturkoeffizient spiegelten auch im ersten Aufwuchs der Versuchswiederholung die Reifezeit der *L. perenne*-

Sorten wider. Somit konnte bestätigt werden, dass sich frühe und späte Sorten in ihrer Ertragsentwicklung und Temperaturreponse unterscheiden.

Um das Spektrum der Wetterbedingungen zu erweitern, wurden die Datensätze des ersten Versuchsjahres und der Versuchswiederholung gepoolt. Dadurch konnten die identifizierten Prozesse bestätigt und die Modellunsicherheit reduziert werden.

In Kapitel 5 wurde gezeigt, dass das phänologische Entwicklungsstadium der *L. perenne*-Sorten, zum Einen bestimmt nach der BBCH-Skala und zum Anderen nach der Mean Stage by Count-Methode, einen engen Zusammenhang sowohl mit der Futterqualität als auch mit dem verdaulichen Ertrag hatte, wobei dieser Zusammenhang für die der BBCH-Skala bestimmten Entwicklungsstadien etwas größer war.

Der optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion, der Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrages, wurde von allen Sorten nach dem für die Futterproduktion üblichen Schnittzeitpunkt, dem Zeitpunkt des Entwicklungsstadiums „Beginn des Ährenschiebens“ (BBCH 51), erreicht. Dies bestätigt die Ergebnisse der modellierten verdaulichen Erträge und der modellbasiert bestimmten optimalen Schnittzeitpunkte aus Kapitel 3. Der optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion konnte weder nach der BBCH-Skala noch nach der Mean Stage by Count-Methode einem bestimmten phänologischen Entwicklungsstadium zugeordnet werden. Allerdings erreichten die frühen Sorten ihren maximalen verdaulichen Ertrag mit einem fortgeschrittenerem Stadium als die späten Sorten. Dies stimmt mit den Ergebnissen aus Kapitel 3 überein, nach denen sich die für die Biogasproduktion optimalen Schnittzeitpunkte der *L. perenne*-Sorten weniger voneinander unterschieden als die für die Futterproduktion üblichen Schnittzeitpunkte. Der Grund dafür liegt in der starken Abhängigkeit des flächenspezifischen Biogasertrages vom Trockenmasseertrag: Da frühe Sorten das Entwicklungsstadium „Beginn des Ährenschiebens“ früher erreichen als spätere Sorten, zu diesem Zeitpunkt aber vergleichsweise wenig Trockenmasse gebildet haben, erreichen sie ihre höchsten Trockenmasseerträge erst mit einem fortgeschritteneren Entwicklungsstadium als die späten Sorten. Somit erreichen sie auch ihre für die Biogasproduktion optimalen Schnittzeitpunkte mit einem fortgeschrittenerem Entwicklungsstadium als die späteren Sorten, aber zu einer ähnlichen Zeit.

Der für die Futterproduktion übliche Schnittzeitpunkt, der Zeitpunkt des Entwicklungsstadiums „Beginn des Ährenschiebens“ (BBCH 51), erwies sich nur für die frühen und

einige mittlere Sorten in den ersten beiden Versuchsjahren als geeigneter Indikator für die optimale Futterqualität. Auf Grund ihrer verzögerten phänologischen Entwicklung erreichten die späten Sorten den Zeitpunkt der optimalen Futterqualität, der mit einem Rohfasergehalt von ca. 23% einher geht, bereits mit einem früheren Entwicklungsstadium. Im dritten Versuchsjahr befanden sich zum Zeitpunkt der optimalen Futterqualität sogar alle Sorten in einem früheren Entwicklungsstadium als BBCH 51. Dies zeigt, dass die optimale Futterqualität nicht allein von phänologischen Entwicklungsstadium abhängt sondern auch von anderen Faktoren wie z.B. Witterungsbedingungen beeinflusst wird.

Mit Hilfe des entwickelten Ertrags- und Qualitätsmodells kann in einer laufenden Vegetationsperiode mit bekanntem Wachstumsbeginn und der Einbeziehung von Wettervorhersagedaten unabhängig vom phänologischen Entwicklungsstadium der optimale Schnitzeitpunkt für einen maximalen Biogasertrag sortenspezifisch vorhergesagt werden. Da in dem Modell Trockenmasseertrag und Rohfasergehalt separat simuliert werden, kann der Schnitzeitpunkt für eine optimale Futterqualität ebenfalls sortenspezifisch vorhergesagt werden.

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit war die Bestimmung des optimalen Schnittzeitpunkts von *Lolium perenne*-Sorten für die Biogasproduktion mit Hilfe eines Modells für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung.

Anhand eines Feldversuchs mit 20 *L. perenne*-Sorten unterschiedlicher Reifezeit, die über zwei Jahre an fünf Standorten in zwei verschiedenen Schnittvarianten geerntet wurden, wurde für den ersten Schnitt beider Jahre ein signifikanter Einfluss des Schnittzeitpunkts auf Grasertrag und -qualität festgestellt. Auf den jährlichen Gesamtertrag hatte der Schnittzeitpunkt, über alle Orte, hingegen keinen signifikanten Einfluss.

Der optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion, der Zeitpunkt des maximalen flächenspezifischen Methanertrages, korrelierte für alle Sorten mit dem maximal verdaulichen Ertrag, d.h. mit der maximalen Differenz aus Trockenmasseertrag und absolutem Rohfasergehalt. Zur Bestimmung des optimalen Schnittzeitpunkts von *L. perenne*-Sorten für die Biogasproduktion wurde daher ein Modell für den sortenspezifischen Ertrags- und Qualitätsverlauf während eines Aufwuchses entwickelt. Um eine sortenspezifische Parametrisierbarkeit zu erreichen, wurden nur die für die sortenspezifische Ertrags- und Qualitätsentwicklung dominanten Prozesse - Biomassewachstum, Qualitätsentwicklung, Temperaturresponse, Globalstrahlungsresponse und Bodenfeuchteresponse - im Modell berücksichtigt. Mit Hilfe des Akaike-Informationskriteriums (AIC) wurde in Abhängigkeit von den Wetterbedingungen das Modell weiter auf Umweltprozesse reduziert, die notwendig waren, um die Ertrags- und Qualitätsentwicklung der Sorten zu erklären. Auf Grund des signifikanten Einflusses des Aufwuchses und des Hauptnutzungsjahres auf Ertrag und Qualität der *L. perenne*-Sorten, bedingt durch die Auswirkungen der vorherigen Schnitte, wurde die Modellparametrisierung für den ersten und dritten Aufwuchs sowie das erste und zweite Hauptnutzungsjahr separat durchgeführt. Zur Modellparametrisierung und -validierung wurden acht *L. perenne*-Sorten unterschiedlicher Reifezeit für drei

Jahre an vier Standorten angebaut und in Zeitreihen um den üblichen ersten und dritten Schnitt geerntet. Auf Basis der erfassten Ertrags-, Qualitäts- und Wetterdaten wurden die sortenspezifischen Modellparameter mittels lokaler, nichtlinearer Optimierung geschätzt. Für den ersten Aufwuchs konnte das Modell mit allen drei Umweltprozessen sortenspezifisch parametrisiert werden. Für den dritten Aufwuchs konnte lediglich das Modell mit den dominantesten Umweltprozessen sortenspezifisch parametrisiert werden, möglicherweise auf Grund ungenauer kritischer Parameter für die Umweltresponen oder auf Grund einer unzureichenden Datendichte. Die sortenspezifischen Modellparameter spiegelten Unterschiede in der Reifezeit und Trockentoleranz der Sorten wider. Der modellbasiert optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion wurde von allen Sorten später erreicht als der für die Futterproduktion übliche Schnittzeitpunkt.

Anhand der Versuchswiederholung des ersten Hauptnutzungsjahres konnte das für den ersten Aufwuchs sortenspezifisch parametrisierte Modell validiert werden, während das für den dritten Aufwuchs parametrisierte Modell weniger gut validiert werden konnte, möglicherweise auf Grund starker Trockenheit in der Versuchswiederholung. Um das Spektrum der Wetterbedingungen zu erweitern, wurden die Daten des ersten Versuchsjahres und der Versuchswiederholung gepoolt. Dadurch konnten die Standardabweichungen der geschätzten Parameter reduziert werden.

Der optimale Schnittzeitpunkt für die Biogasproduktion, der Zeitpunkt des maximal verdaulichen Ertrages, konnte weder nach der BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und CHemische Industrie)-Skala noch nach der MSC (Mean Stage by Count)-Methode einem bestimmten phänologischen Entwicklungsstadium zugeordnet werden. Tendenziell erreichten jedoch die frühen Sorten ihren maximalen verdaulichen Ertrag mit einem fortgeschrittenerem Stadium als die späten Sorten.

Der für die Futterproduktion übliche Schnittzeitpunkt, der Zeitpunkt des Entwicklungsstadiums „Beginn des Ährenschiebens“ (BBCH 51) erwies sich nicht für alle Sorten und in allen Versuchsjahren als geeigneter Indikator für die optimale Futterqualität. Vor allem die späten Sorten erreichten den Zeitpunkt der optimalen Futterqualität bereits mit einem früheren Entwicklungsstadium.

Mit Hilfe des entwickelten Ertrags- und Qualitätsmodells kann in einer laufenden Vegetationsperiode mit bekanntem Wachstumsbeginn und der Einbeziehung von Wettervorhersagedaten unabhängig vom phänologischen Entwicklungsstadium sowohl der optimale

Schnittzeitpunkt für einen maximalen Biogasertrag als auch für die beste Futterqualität sortenspezifisch vorhergesagt werden.

Literaturverzeichnis

- AKAIKE, H. (1978). *A Bayesian analysis of the minimum AIC procedure*. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 30:9–14.
- AMON, T., B. AMON, V. KRYVORUCHKO, A. MACHMÜLLER, K. HOPFNER-SIXT, V. BODIROZA, R. HRBEK, J. FRIEDEL, E. PÖTSCH, H. WAGENTRISTL, M. SCHREINER und W. ZOLLITSCH (2007). *Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations*. Bioresource Technology, 98(17):3204–3212.
- BARRETT, P. D., A. S. LAIDLAW und C. S. MAYNE (2005). *GrazeGro: a European herbage growth model to predict pasture production in perennial ryegrass swards for decision support*. European Journal of Agronomy, 23:37–56.
- BEVEN, K. und P. YOUNG (2013). *A guide to good practice in modeling semantics for authors and referees*. Water Resources Research, 49:1–7.
- BROWN, J. D. und G. B. M. HEUVELINK (2005). *Assessing Uncertainty Propagation Through Physically based Models of Soil Water Flow and Solute Transport*. In: ANDERSON, M. G. und J. J. McDONNELL, Hrsg.: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, Kap. 79, S. 1181–1195. Wiley, Hoboken, New Jersey, 1. Aufl.
- BUNDESSORTENAMT (2009). *Beschreibende Sortenliste 2009. Futtergräser, Esparsette, Klee, Luzerne*. Bundessortenamt, Hannover.
- BUNDESSORTENAMT (2011). *Beschreibende Sortenliste 2011. Futtergräser, Esparsette, Klee, Luzerne*. Bundessortenamt, Hannover.

- BUXTON, D. R. (1996). *Quality-related characteristics of forages as influenced by plant environment and agronomic factors*. Animal Feed Science and Technology, 59(1-3):37–49.
- CRUSH, J. R., H. S. EASTON, J. E. WALLER, D. E. HUME und M. J. FAVILLE (2007). *Genotypic variation in patterns of root distribution, nitrate interception and response to moisture stress of a perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) mapping population*. Grass and Forage Science, 62(3):265–273.
- DMK (2013). *Silomaisanbaufläche in Deutschland im mehrjährigen Vergleich*. <http://www.maiskomitee.de>, 20.06.2013.
- DON, A., B. OSBORNE, A. HASTINGS, U. SKIBA, M. S. CARTER, J. DREWER, H. FLESSA, A. FREIBAUER, N. HYVÖNEN, M. B. JONES, G. J. LANIGAN, U. MANDER, A. MONTI, S. N. DJOMO, J. VALENTINE, K. WALTER, W. ZEGADA-LIZARAZU und T. ZENONE (2012). *Land-use change to bioenergy production in Europe: Implications for the greenhouse gas balance and soil carbon*. GCB Bioenergy, 4(4):372–391.
- DWD (2014). *Presentation of Soil Moisture*. <http://www.dwd.de>, 29.09.2014.
- FARRELL, A. D. und T. J. GILLILAND (2011). *Yield and quality of forage maize grown under marginal climatic conditions in Northern Ireland*. Grass and Forage Science, 66(2):214–223.
- FNR (2014). *Massenbezogener Substrateinsatz in Biogasanlagen 2013*. <http://biogas.fnr.de>, 20.01.2015.
- FOITO, A., S. L. BYRNE, T. SHEPHERD, D. STEWART und S. BARTH (2009). *Transcriptional and metabolic profiles of *Lolium perenne* L. genotypes in response to a PEG-induced water stress*. Plant Biotechnology Journal, 7:719–732.
- FRIESLAND, H. und F.-J. LÖPMEIER (2007). *The performance of the model AMBAV for evapotranspiration and soil moisture on Müncheberg data*. In: KERSEBAUM, K. C., J.-M. HECKER, W. MIRSCHEL und M. WEGEHENKEL, Hrsg.: *Modelling water and nutrient dynamics in soil-crop systems - Proceedings of a workshop held 2004 in Müncheberg, Germany*, S. 19–26.

- GILLILAND, T. J., M. S. CAMLIN und J. JOHNSTON (1995). *Effect of harvest date and cultivar maturity on perennial ryegrass (Lolium Perenne L.) yield and digestibility*. Irish Journal of Agricultural and Food Research, 34:133–142.
- HERRMANN, A., M. KELM, A. KORNER und F. TAUBE (2005). *Performance of grassland under different cutting regimes as affected by sward composition, nitrogen input, soil conditions and weather - a simulation study*. European Journal of Agronomy, 22(2):141–158.
- HERRMANN, A. und G. A. SCHACHTEL (2001). *OSYAQ, an organ-specific growth model for forage grasses*. Grass and Forage Science, 56(3):268–284.
- HERRMANN, A., E. TECHOW und F. TAUBE (2012). *Biogasproduktion von Grünland- und Futterbauflächen in Norddeutschland*. In: *Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau*, Bd. 13, S. 15–24.
- JOHNSON, I. R. und J. H. M. THORNLEY (1983). *Vegetative crop growth model incorporating leaf area expansion and senescence, and applied to grass*. Plant, Cell and Environment, 6(9):721–729.
- JOUVEN, M., P. CARRÈRE und R. BAUMONT (2006). *Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description*. Grass and Forage Science, 61(2):112–124.
- KANDEL, T. P., S. SUTARYO, H. B. MØLLER, U. JØRGENSEN und P. E. LÆRKE (2013). *Chemical composition and methane yield of reed canary grass as influenced by harvesting time and harvest frequency*. Bioresource Technology, 130:659–666.
- KORNER, A., P. NYMAN und F. TAUBE (1991). *Ein ComputermodeLL zur Berechnung der Qualität und Qualitätsveränderung von gräserdominierten Grünlandaufwüchsen aus Witterungsdaten*. Das wirtschaftseigene Futter, 37(1-2):232–248.
- KORNER, A. und F. TAUBE (2008). *Futtergräser*. In: HANUS, H., K.-U. HEYLAND und R. KELLER, Hrsg.: *Getreide und Futtergräser*, Bd. 2 d. Reihe *Handbuch des Pflanzenbaus*, S. 583–617. Ulmer, Stuttgart.

- MCENIRY, J. und P. O'KIELY (2013). *Anaerobic methane production from five common grassland species at sequential stages of maturity*. Bioresource Technology, 127:143–150.
- MEIER, U. (1997). *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants (BBCH-Monograph)*. Blackwell, Berlin.
- MOORE, A. D., J. R. DONNELLY und M. FREER (1997). *GRAZPLAN: Decision support systems for Australian grazing enterprises. III. Pasture growth and soil moisture submodels, and the GrassGro DSS*. Agricultural Systems, 55(4):535–582.
- MOORE, K. J., L. E. MOSER, K. P. VOGEL, S. S. WALLER, B. E. JOHNSON und J. F. PEDERSEN (1991). *Describing and quantifying growth stages of perennial forage grasses*. Agronomy Journal, 83(6):1073–1077.
- NASH, J. E. und J. V. SUTCLIFFE (1970). *River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles*. Journal of Hydrology, 10(3):282–290.
- NAUMANN, C. und R. BASSLER (1976). *Die chemische Untersuchung von Futtermitteln, mit Ergänzungslieferungen 3-5*, Bd. 3 d. Reihe *Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (Methodenbuch)*. VDLUFA, Darmstadt, 3. Aufl.
- PROCHNOW, A., M. HEIERMANN, M. PLÖCHL, B. LINKE, C. IDLER, T. AMON und P. J. HOBBS (2009). *Bioenergy from permanent grassland - A review- 1. Biogas*. Bioresource Technology, 100(21):4931–4944.
- QUAKERNACK, R., A. PACHOLSKI, A. TECHOW, A. HERRMANN, F. TAUBE und H. KAGE (2012). *Ammonia volatilization and yield response of energy crops after fertilization with biogas residues in a coastal marsh of Northern Germany*. Agriculture, Ecosystems and Environment, 160:66–74.
- SACKVILLE HAMILTON, N. R., L. SKØT, K. H. CHORLTON, I. D. THOMAS und S. MIZEN (2002). *Molecular genecology of temperature response in Lolium perenne: 1. Preliminary analysis to reduce false positives*. Molecular Ecology, 11(9):1855–1863.

- SCHAPENDONK, A. H. C. M., W. STOL, D. W. G. VAN KRAALINGEN und B. A. M. BOUMAN (1998). *LINGRA, a sink/source model to simulate grassland productivity in Europe*. European Journal of Agronomy, 9(2-3):87–100.
- SCHOMANN, S. (2015). *Sortenspezifische Simulation des Sommeraufwuchses von Lolium perenne - Modellselektion, Parameterschätzung, Validierung*. Masterarbeit, Technische Universität Braunschweig.
- SELING, K., A. HERRMANN, B. WIENFORTH, F. TAUBE, S. OHL, E. HARTUNG und H. KAGE (2013). *Biogas cropping systems: Short term response of yield performance and N use efficiency to biogas residue application*. European Journal of Agronomy, 47:44–54.
- SKØT, L., M. O. HUMPHREYS, I. ARMSTEAD, S. HEYWOOD, K. P. SKØT, R. SANDERSON, I. D. THOMAS, K. H. CHORLTON und N. R. S. HAMILTON (2005). *An association mapping approach to identify flowering time genes in natural populations of Lolium perenne (L.)*. Molecular Breeding, 15(3):233–245.
- SKØT, L., N. R. SACKVILLE HAMILTON, S. MIZEN, K. H. CHORLTON und I. D. THOMAS (2002). *Molecular genecology of temperature response in Lolium perenne: 2. Association of AFLP markers with ecogeography*. Molecular Ecology, 11(9):1865–1876.
- SONNLEITNER, E. (2013). *Kontinuierliche Vergärung im 5-Liter Maßstab - Vergärung zu unterschiedlichen Schnittzeitpunkten*. Präsentation, Bonn.
- SPAIN, J. D. (1982). *BASIC Microcomputer Models in Biology*. Addison-Wesley, London.
- SPONAGEL, H. (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Schweizerbart, Stuttgart, 5. Aufl.
- TAUBE, F. (1986). *Wachstumsanalytische Untersuchungen an Deutschem Weidelgras und Knaulgras im Vegetationsablauf unter besonderer Berücksichtigung des Schnittzeitpunktes im 1. Aufwuchs*. Diss. Univ., Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- TECHOW, A., R. QUAKERNACK, A. PACHOLSKI, H. KAGE, F. TAUBE und A. HERRMANN (2011). *Deutsches Weidelgras in der Biogasproduktion: Beeinflussung des Me-*

thanertrages durch Reifegruppe und Schnittregime. In: *Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau*, Bd. 12, S. 147–151.

WEISSBACH, F. (2008). *Zur Bewertung des Gasbildungspotentials von nachwachsenden Rohstoffen.* Landtechnik, 63(6):356–358.

WHITEHEAD, D. C. (1995). *Grassland Nitrogen.* CAB International, Wallingford, UK.

YEMM, E.W., A.J. WILLIS (1954). *The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone.* Biochemical Journal, 54(3):508–514.

Anhang A.

Varianzanalysen der Qualitätsmerkmale Trockensubstanz, Rohfaser, Rohprotein und Zucker

Tabelle A.1.: *F*-Werte und Signifikanzniveaus der Faktoren Ort, Schnittvariante (SV), Sorte und ihrer Wechselwirkungen für die Qualitätsmerkmale des ersten Schnittes Trockensubstanz (TS), Rohfaser (XF), Rohprotein (XP) und wasserlösliche Zucker (WSC), berechnet mit dreifaktoriellen ANOVAs für jedes Hauptnutzungsjahr.

Varianzursache	df	F-Wert							
		TS		XF		XP		WSC	
		2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Ort	4	3	165,2***	1658,5***	356,7***	982,4***	212,4***	364,2***	413,2***
SV	1	1	13,4***	12,8***	51,5***	4,7*	63,8***	132,4***	0,01
Sorte	19	19	21,0***	14,2***	9,0***	13,2***	3,7***	12,3***	5,6***
Ort:SV	4	3	9,6***	101,0***	46,8***	1,1	3,9**	7,2***	26,1***
Ort:Sorte	76	57	2,6***	4,6***	2,8***	4,7***	1,3*	4,2***	2,0***
SV:Sorte	19	19	8,4***	3,6***	18,8***	23,7***	10,9***	19,7***	1,6
Ort:SV:Sorte	76	57	1,5**	2,4***	1,2.	3,9***	1,2	3,7***	0,9

. *P*<0,1; * *P*<0,05; ** *P*<0,01; *** *P*<0,001.

Tabelle A.2.: *F*-Werte und Signifikanzniveaus der einzelnen Faktoren Ort, Schnittvariante (SV), Sorte und ihrer Zweier-Wechselwirkungen für die Qualitätsmerkmale des ersten Schnittes Trockensubstanz (TS), Rohfaser (XF), Rohprotein (XP) und wasserlösliche Zucker (WSC), berechnet mit ein- und zweifaktoriellen ANOVAs für jedes Hauptnutzungsjahr.

Varianzursache	df	F-Wert											
		TS				XF				XP			
		2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Ort	4		3	74,1***	576,9***	144,2***	307,4***	134,0***	113,0***	284,7***	248,6***		
SV	1		1	4,1*	1,0	11,2***	0,5	22,2***	25,3***	0,0002	10,1**		
Sorte	19		19	7,7***	1,1	1,9**	1,5.	1,3	2,4**	1,4	1,6.		
Ort:SV	4		3	4,4**	45,3***	22,4***	0,4	2,6*	2,5.	20,3***	4,5**		
Ort:Sorte	76		57	1,8***	2,2***	1,3.	1,9***	0,8	1,6**	1,7***	2,4***		
SV:Sorte	19		19	3,3***	0,3	4,6***	2,7***	4,2***	4,6***	0,4	0,8		

.*P*<0,1; **P*<0,05; ***P*<0,01; ****P*<0,001.

Tabelle A.3.: *F*-Werte und Signifikanzniveaus des Faktors Schnittvariante (SV) für die sortenspezifischen Qualitätsmerkmale Trockensubstanz (TS), Rohfaser (XF), Rohprotein (XP) und wasserlösliche Zucker (WSC) des ersten Schnittes, berechnet mit einfaktoriellen ANOVAs für jedes Hauptnutzungsjahr.

Sorte (Reifezeit) [Tage nach 1.4.]	<i>df</i>	<i>F</i> -Wert									
		TS		XF		XP		WSC			
		2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Lipresso (41)	1	11,4**	1,7	10,8**	14,6***	12,1**	24,6***	1,3	0,1		
Liconda (45)	1	15,3***	1,1	3,4.	3,3.	0,5	8,8**	0,9	0,1		
Abersilo (46)	1	21,1***	1,0	8,1**	31,3***	5,1*	25,4***	0,4	1,1		
Lilora (48)	1	5,8*	1,0	4,3*	2,8	3,6.	10,5**	1,1	0,7		
Trintella (48)	1	5,5*	0,2	0,3	0,8	0,3	6,6*	0,01	3,8e-05		
Aubisque (50)	1	0,6	0,01	0,03	0,02	1,1	1,6	0,3	0,7		
Respect (51)	1	3,8e-31	0,01	0,1	0,1	0,4	1,0	0,03	0,9		
Femema (52)	1	0,005	0,6	0,4	0,002	0,5	0,4	0,1	0,1		
Bargala (52)	1	0,5	0,0003	2,7	0,03	1,0	1,5	0,1	0,5		
Chicago (53)	1	0,1	0,04	1,9	1,4	1,2	2,1	0,4	2,2		
Barata (53)	1	1,3	0,1	1,7	0,01	3,5.	1,2	0,1	0,2		
Eurocity (54)	1	1,0	0,1	1,9	0,03	2,2	1,5	0,1	0,2		
Niata (55)	1	0,5	0,4	0,9	0,02	2,5	0,1	0,01	0,03		
Toledo (57)	1	2,1	0,002	13,6***	2,3	13,7***	0,6	0,8	1,3		
Aberavon (59)	1	2,2	0,002	3,8.	0,9	4,4*	0,1	0,5	0,03		
Denver (60)	1	0,6	0,5	10,4**	3,6.	8,1**	3,2.	0,6	1,0		
Licampo (60)	1	4,6*	0,1	5,0*	1,2	14,5***	4,2.	0,8	0,5		
Stefani (60)	1	1,7	0,1	9,0**	2,6	13,0**	0,002	0,4	2,0		
Forza (62)	1	2,8	0,03	16,1***	4,0.	8,9**	0,02	0,3	3,6.		
Sponsor (63)	1	2,4	0,04	6,6*	4,8*	7,1*	0,3	0,1	6,0*		

. $P < 0,1$; * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$.

Anhang B.

**Parameter des Modells mit integrierter
Temperatur-, Bodenfeuchte- und
Globalstrahlungsresponse**

Tabelle B.1.: Geschätzte sortenspezifische Modellparameter Wachstumsrate r_{\max} , Temperaturkoeffizient Q_{10} , Strahlungsparame-
ter β und Bodenfeuchteparameter γ des Ertragsmodells mit allen drei Umweltprozessen Temperatur-,
Bodenfeuchte- und Globalstrahlungsresponse für das erste Hauptnutzungsjahr H_1 und den ersten a und dritten
Schnitt b.

Sorte	H_{1a} r_{\max} [d ⁻¹]	H_{1a} Q_{10} [°C ⁻¹]	H_{1a} β [J cm ⁻²]	H_{1a} γ [% nFK ⁻¹]	H_{1b} r_{\max} [d ⁻¹]	H_{1b} Q_{10} [°C ⁻¹]	H_{1b} β [J cm ⁻²]	H_{1b} γ [% nFK ⁻¹]
Aba	0,23±0,02	2,76±0,18	3,56±0,98	0,56±0,35	0,19±0,04	1,98±1,79	1,15±1,42	1,98±2,85
Abs	0,19±0,02	2,49±0,21	4,55±1,11	0,63±0,54	0,28±0,05	2,99±0,60	0,81±1,09	0,00±0,16
Aub	0,21±0,02	2,70±0,20	3,38±1,72	0,85±0,38	0,16±0,04	2,99±0,79	3,21±3,54	3,82±3,52
Bar	0,23±0,01	2,97±0,26	2,90±1,43	0,57±0,29	0,20±0,04	2,95±1,00	0,53±1,12	3,81±4,39
Fen	0,22±0,01	2,90±0,15	4,53±1,71	0,97±0,37	0,17±0,06	1,53±4,01	0,55±2,14	4,44±6,92
Lip	0,18±0,02	2,58±0,25	4,63±3,39	0,66±0,53	0,16±0,01	2,89±0,44	3,82±1,37	2,15±2,24
Res	0,25±0,02	2,99±0,24	3,15±1,74	0,40±0,27	0,17±0,03	2,77±0,99	1,94±1,11	3,25±3,31
Spo	0,25±0,02	2,93±0,14	3,05±1,17	0,30±0,23	0,27±0,11	2,25±2,03	0,50±2,14	0,13±0,25

Tabelle B.2.: Geschätzte sortenspezifische Modellparameter Wachstumsrate r_{\max} , Temperaturkoeffizient Q_{10} , Strahlungsparame-
ter β und Bodenfeuchteparameter γ des Ertragsmodells mit allen drei Umweltprozessen Temperatur-,
Bodenfeuchte- und Globalstrahlungsresponse für das zweite Hauptnutzungsjahr H_2 und den ersten a und drit-
ten Schnitt b.

Sorte	H_{2a} r_{\max} [d^{-1}]	H_{2a} Q_{10} [$^{\circ}C^{-1}$]	H_{2a} β [$J\ cm^{-2}$]	H_{2a} γ [% nFK^{-1}]	H_{2b} r_{\max} [d^{-1}]	H_{2b} Q_{10} [$^{\circ}C^{-1}$]	H_{2b} β [$J\ cm^{-2}$]	H_{2b} γ [% nFK^{-1}]
Aba	0,20 \pm 0,02	2,38 \pm 0,14	0,75 \pm 0,63	5,00 \pm 12,89	0,19 \pm 0,07	2,63 \pm 1,20	1,90 \pm 3,15	1,09 \pm 0,88
Abs	0,14 \pm 0,02	1,59 \pm 0,84	1,67 \pm 0,58	4,58 \pm 10,05	0,19 \pm 0,03	3,00 \pm 1,07	2,94 \pm 3,58	2,68 \pm 1,37
Aub	0,17 \pm 0,01	1,92 \pm 0,33	1,50 \pm 0,45	4,86 \pm 9,54	0,17 \pm 0,02	2,98 \pm 0,77	3,31 \pm 2,10	2,29 \pm 1,06
Bar	0,13 \pm 0,01	2,04 \pm 0,22	2,40 \pm 0,89	4,63 \pm 8,34	0,30 \pm 0,11	2,99 \pm 0,57	0,50 \pm 2,10	2,67 \pm 1,44
Fen	0,16 \pm 0,01	2,32 \pm 0,12	2,27 \pm 1,06	2,58 \pm 1,75	0,16 \pm 0,02	3,00 \pm 0,95	4,61 \pm 3,05	3,61 \pm 1,30
Lip	0,15 \pm 0,01	1,36 \pm 0,53	0,84 \pm 0,51	4,96 \pm 12,54	0,16 \pm 0,02	2,49 \pm 0,87	4,52 \pm 2,97	3,20 \pm 1,22
Res	0,16 \pm 0,01	1,86 \pm 0,23	0,87 \pm 0,45	5,00 \pm 13,15	0,23 \pm 0,05	2,56 \pm 0,80	1,87 \pm 2,28	0,98 \pm 0,99
Spo	0,15 \pm 0,01	2,41 \pm 0,13	3,18 \pm 1,29	4,95 \pm 8,35	0,20 \pm 0,08	2,07 \pm 1,16	1,52 \pm 2,71	3,05 \pm 1,44